

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE DOS ESTACIONES DE SEPARACIÓN HIDROCICLONICA EN UNA PLANTA EXTRACTORA DE ALMIDÓN DE YUCA

Diana Isabel Rivera Henao

Erika Vargas Sánchez

diana.rivera.h@correounivalle.edu.co

erika.vargas@correounivalle.edu.co

Trabajo de grado dirigido a la

Universidad del Valle

Como requisito parcial para obtener el título de

INGENIERA AGRÍCOLA



Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente

Santiago de Cali

Valle del Cauca, COLOMBIA

Abril de 2017

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE DOS ESTACIONES DE SEPARACIÓN
HIDROCICLONICA EN UNA PLANTA EXTRACTORA DE ALMIDÓN DE YUCA**

Diana Isabel Rivera Henao

Erika Vargas Sánchez

diana.rivera.h@correounivalle.edu.co

erika.vargas@correounivalle.edu.co

Trabajo de grado dirigido a la

Universidad del Valle

Director:

Martin Alfonso Moreno Santander, M.Sc

Co-Director:

Gustavo Adolfo Velez Hernandez, M.Sc

Escuela de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente

Santiago de Cali

Valle del Cauca, COLOMBIA

Abril de 2017

Reconocimientos

Gracias a Dios por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, a mi padre por ser una luz en mi vida, a mi madre por ser mi mayor fortaleza, gracias porque me han dado la mejor educación y me brindaron una hermosa familia llena de valores, amor y apoyo incondicional, a mis hermanos y hermanas que son un ejemplo a seguir para mí y me han ayudado en todo mi proceso de formación personal y profesional, a mis sobrinos por ser una motivación para superar todos los retos, a mi mascota por ser mi compañía en el desarrollo de este proyecto y gracias a mis familiares, amigos y conocidos que de una u otra forma han hecho parte de mi desarrollo académico y personal. Gracias a todos por haber estado en mi camino, por ayudar a fortalecer mi corazón e iluminar mi mente, por ser una guía y compañía durante todo este proceso académico.

Un agradecimiento especial a mi hermano Arley Rivera Henao por ser como un padre para mí y acompañarme en este proceso de formación, brindándome su apoyo incondicional, gracias infinitas mis triunfos son los tuyos.

Diana Isabel Rivera Henao.

Agradezco a Dios por iluminar siempre mi camino, a mis padres por formarme como ser humano con dedicación y cariño, inculcándome lo valioso que es el conocimiento para lograr las metas que me proponga en la vida. Doy gracias a mi abuela por ser una segunda madre para mí, brindándome todo su amor y sabiduría. Gracias a mi tía por su compañía, cariño y valiosa amistad. Agradezco a mi hermana por escucharme y buscar siempre la forma de alegrarme para despejar mi mente cuando más lo necesitaba. Al igual agradezco a mis familiares por todas las experiencias vividas con ellos, las cuales me hacen ser quien soy hoy.

Quiero agradecer a mi novio por el apoyo incondicional y su colaboración durante el proceso de este proyecto, demostrándome siempre todo su amor, buscando siempre mi progreso como persona y profesional. También agradezco a mi mascota Gaia por desvelarse junto a mí durante mis estudios. Por ultimo agradezco a mis compañeros y amigos por su apoyo durante todo el pregrado.

Erika Vargas Sánchez.

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a la Universidad del Valle, a su escuela de recursos naturales y del medio ambiente (EIDENAR), y de manera especial a sus docentes por aquellos conocimientos técnicos, científicos y personales que nos brindaron dándonos las bases fundamentales para culminar con éxito nuestra carrera profesional de Ingenieras Agrícolas. El principal agradecimiento es para nuestro director de tesis el ingeniero Martin Alonso Moreno S. y para nuestro Co-director el ingeniero Gustavo Adolfo Vélez H., por su colaboración y apoyo incondicional durante el desarrollo del proyecto, también a la empresa Deriyuca Ltda. y a sus colaboradores por prestar sus instalaciones y brindar su acompañamiento durante la fase experimental de este trabajo de grado.

Índice general

Resumen.....	1
Abstract.....	2
Introducción	3
1.1 Introducción	3
Revisión de literatura	7
2.1. Yuca (<i>Manihot esculenta</i> Crantz).....	7
2.2. Proceso de extracción de almidón de yuca en las rallanderías	8
2.2.1. Aprovechamiento de la gravedad	8
2.2.2. Consumo de agua en la rallandería	8
2.2.3. Recepción de las raíces.....	10
2.2.4. Lavado de las raíces.....	10
2.2.5. Rallado de las raíces	10
2.2.6. Separación de la “lechada de almidón”	11
2.2.7. Tamizado de la ‘lechada de almidón’	11
2.2.8. Sedimentación	11
2.2.9. Secado	12
2.3 Descripción del Hidrociclón.....	14
2.3.1. Movimiento de partículas en un hidrociclón.....	15
2.3.2. Consideraciones de diseño y operación en un hidrociclón.....	16
2.3.3. Configuración de múltiples hidrociclones	18
2.4 Diseño de Experimentos.....	22
2.4.1 Diseño Completamente Aleatorizado o Completamente al Azar (DCA)	23
2.4.2. Análisis de Varianza o ANOVA.....	23
2.4.3. Prueba Post-ANOVA	29
Metodología	31
3.1. Flujos de trabajo en la planta	31
3.2 Características de los hidrociclones empleados	32
3.2.1 Determinación de la configuración de los hidrociclones	32
3.3 Descripción de montajes de las estaciones	34
3.4. Toma de muestras y prueba de materia seca.....	36
3.5 Eficiencia de la Configuración de Hidrociclones.....	38

Eficiencia de Separación de Sólidos	39
Eficiencia Relativa al Flujo de Entrada	39
3.6 Importancia de la reutilización del agua para el consumo en la rallandería	39
3.7 Software utilizado para el DCA.....	40
Presentación y Análisis de Resultados	44
4.1. Datos obtenidos	44
4.2 Análisis Estadístico de los Resultados de la Eficiencia Relativa de la Configuración de las Estaciones Hidrociclónicas Implementadas.....	50
4.3. Determinación del flujo de agua para recirculación.....	59
Conclusiones y Recomendaciones.....	60
5.1 Conclusiones	60
5.2 Recomendaciones	61
Referencias Bibliográficas	63
Anexos	67
A1. Balance de masas proporcionado por la empresa Deriyuca Ltda.	67
A2. Fotografías de las estaciones hidrociclonicas implementadas.....	68
A3. Almidón y mancha después de la prueba de materia seca.....	69

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Variables operacionales y geométricas del hidrociclón	16
Tabla 2.2. Eficiencias de ciclones en paralelo	20
Tabla 2.3. Estructura de registro de los datos para un ANOVA a una vía de clasificación.....	24
Tabla 2.4. Análisis de varianza.....	27
Tabla 2.5. Análisis de varianza corregido por la media.	27
Tabla 2.6. ANOVA a una vía para efectos aleatorios.	28
Tabla 3.1. Dimensiones de los hidrociclones utilizados.	33
Tabla 3.2. Características y ventajas de los métodos de comparación múltiple presentes en Minitab.	42
Tabla 4.1. Masa de la botella y masa de la botella más lechada en la primera estación.....	45
Tabla 4.2. Masa de la botella y masa de la botella más lechada en la segunda estación.	45
Tabla 4.3. Masa del almidón, mancha y agua en la primera estación.	46
Tabla 4.4. Masa del almidón, mancha y agua en la primera estación.	46
Tabla 4.5. Concentraciones de almidón, mancha y agua por cada réplica en la primera estación hidrociclónica.....	47
Tabla 4.6. Concentraciones de almidón, mancha y agua por cada réplica en la segunda estación hidrociclónica.....	47
Tabla 4.7. Concentración de sólidos en la alimentación del conjunto de estaciones.....	48
Tabla 4.8. Concentración de sólidos en el Overflow de la segunda estación.	48
Tabla 4.9. Flujo másico y flujo volumétrico en la primera estación hidrociclónica.....	49
Tabla 4.10. Flujo másico y flujo volumétrico en la segunda estación hidrociclónica.	49
Tabla 4.11. Flujo de agua en el Overflow de la segunda estación	50
Tabla 4.12. Eficiencia relativa de la configuración de las estaciones hidrociclónicas implementadas	50
Tabla 4.13. Estructura de los datos para el ANOVA del experimento.....	51

Índice de Figuras

Figura 2.1. Corte transversal de la raíz de yuca.....	8
Figura 2.2. Flujograma del proceso de extracción de almidón de yuca	9
Figura 2.3. Diseño de las Instalaciones de una Rallandería	13
Figura 2.4. Partes principales de un Hidrociclón	15
Figura 2.5. Ciclones en configuración serie	19
Figura 2.6. Hidrociclones en configuración paralelo	20
Figura 2.7. Esquema de operación del proceso de producción de almidón de yuca con el uso de hidrociclón	21
Figura 3.1. Representación de las dimensiones de los hidrociclones utilizados.....	33
Figura 3.2. Hidrociclón utilizado.....	34
Figura 3.3 Sitio escogido para la construcción de las estaciones hidrociclónicas.	35
Figura 3.4. Diagrama de la configuración en las estaciones hidrociclónicas implementadas.	36
Figura 3.5. Sedimentación de muestras de lechada a 72 horas.	38
Figura 4.1. Gráfica de probabilidad normal de los residuos para respuesta ante presión de entrada a 50 psi.....	51
Figura 4.2. Gráfica de probabilidad normal de los residuos para respuesta ante presión de entrada a 70 psi.....	52
Figura 4.3. Gráfica de probabilidad normal de los residuos para respuesta ante presión de entrada a 70 psi.....	52
Figura 4.4. Gráfica de intervalos de los datos de respuesta del experimento.	53
Figura 4.5. Resultado de la prueba de potencia y tamaño y de la muestra.	54
Figura 4.6. Curva de potencia para ANOVA de un solo factor dependiendo de la diferencia significativa máxima.	54
Figura 4.7. Gráfica de prueba de varianzas iguales para los datos de los tratamientos.	55
Figura 4.8. Resultados de la prueba del ANOVA.	55
Figura 4.9. Gráfica de distribución F según grados de libertad obtenidos en el ANOVA.	56
Figura 4.10. Resultados de la prueba de comparación de Bonferroni.	57
Figura 4.11. Intervalos de confianza simultáneos de 95% en la prueba de Bonferroni.	58
Figura 4.12. Gráfica de efectos principales de los niveles de presión.	59

Lista de Abreviaturas

<i>DBO</i>	Demanda biológica de oxígeno
<i>DQO</i>	Demanda bioquímica de oxígeno
<i>CIAT</i>	Centro internacional de agricultura tropical
<i>UE</i>	Unidad experimental
<i>EE</i>	Error experimental
<i>DCA</i>	Diseño completamente aleatorizado
<i>ANOVA</i>	Análisis de varianza
<i>SC</i>	Sumas de cuadrados
<i>SCT</i>	Suma de cuadrados total
<i>SCTra</i>	Suma de cuadrados del tratamiento
<i>SCE</i>	Suma de cuadrados del error
<i>GL</i>	Grados de libertad
<i>CM</i>	Cuadrados medios esperados
<i>E (CM)</i>	Cuadrados medios esperados en función del efecto
<i>CMTra</i>	Cuadrados medios del tratamiento
<i>CM</i>	Cuadrados medios
<i>CMA</i>	Cuadrados medios del factor
<i>DBCA</i>	Diseño de bloques completos al azar
<i>LSD</i>	Diferencia mínima significativa (Least significant difference)
<i>PVC</i>	Policloruro de vinilo

Lista de Símbolos

α	Significancia estadística
ϵ_{ij}	Error experimental aleatorio asociado a las observaciones
σ	Varianza
β	Nivel de confianza
y_{ij}	Variable de respuesta del i-ésimo tratamiento en la j-ésima réplica
$y_{..}$	Sumatoria de todas las y_{ij}
r	Número de réplicas
u_i	Media de la población i-ésima
n	Número de unidades experimentales
t	Número de tratamientos
$S1$	Primera estación
$S2$	Segunda estación
$F1$	Alimentación primera estación
$F2$	Alimentación segunda estación
$O1$	Overflow de la primera estación
$O2$	Overflow de la segunda estación
$U1$	Underflow primera estación
$U2$	Underflow segunda estación
E	Eficiencia de separación de sólidos
E_r	Eficiencia relativa
$\dot{M}_{AlmidónOi}$	Flujo másico de almidón en el Overflow de la i-ésima estación
$\dot{M}_{AlmidónUi}$	Flujo másico de almidón en el Underflow de la i-ésima estación
$\dot{M}_{AlmidónT}$	Flujo másico de almidón en la entrada de la primera estación
$C_{\%AlmidónUi}$	Concentración de almidón en el Underflow de la i-ésima estación
$\dot{M}_{\%Ui}$	Flujo másico total en el Underflow de la i-ésima estación

$\dot{M}_{\%O1}$	Flujo másico total del Overflow de la primera estación
H_0	Hipótesis nula
H_1	Hipótesis no nula
C_i	Contrastes
n_i	Número de intervalos
ρ_s	Densidad de la lechada en la alimentación
u_s	Viscosidad de la lechada
V_f	Velocidad de alimentación
D_c	Diámetro del hidrociclón
D_a	Diámetro del Ápex
D_v	Diámetro del Vortex
D_f	Diámetro de alimentación
L_v	Longitud del vortex
P	Presión
$H1$	Altura 1 del hidrociclón
$H2$	Altura 2 del hidrociclón
Q_f	Caudal volumétrico de la pulpa

Resumen

Este documento describe el desarrollo del proyecto de implementación y evaluación de dos estaciones hidrociclónicas en una planta extractora de almidón de yuca perteneciente a la empresa Deriyuca Ltda. ubicada en el norte del departamento del Cauca.

En el desarrollo de este documento se muestra el proceso tradicional de extracción de almidón de yuca, donde se explica cada subproceso y el consumo de agua aproximado en la planta extractora, con el fin de determinar el lugar más adecuado para la instalación de las estaciones hidrociclónicas.

La planta extractora poseía hidrociclones que fueron adquiridos buscando aumentar la eficiencia en la sedimentación de almidón y disminuir el consumo de agua. Para el uso de estos equipos es necesario conocer de forma general del funcionamiento interno y características geométricas de cada uno. A partir de esta información y con los flujos de trabajo de la planta, se determina el número de hidrociclones y la configuración para la implementación de las estaciones hidrociclónicas, presentando los materiales necesarios y el sitio óptimo en el proceso para la ubicación de estas. Además se realizan recomendaciones para el control de los parámetros antes de realizar la evaluación de las estaciones.

El diseño del experimento con el que se busca evaluar las estaciones es realizado estableciendo previamente las variaciones en la presión, a partir de lo cual se determina el número de toma de muestras en cada hidrociclón por cada cambio de presión. Para este caso se establecen presiones de 50, 70 y 75 psi. Los datos del muestreo se encuentran registrados en el documento junto con la información de la prueba de materia seca realizada a las muestras tomadas. El análisis estadístico para las muestras es un diseño completamente aleatorizado (*DCA*), y se desarrolló con ayuda del software estadístico Minitab 17.

Con el procesamiento de la información en el software se logró el análisis de los datos para determinar la presión a la cual son más eficientes las estaciones para el proceso de sedimentación, además de identificar el funcionamiento de los hidrociclones en la separación de almidón. Respecto a la cantidad de agua que se logra recuperar de este subproceso, se determina la cantidad y el lugar donde esta puede ser reincorporada, disminuyendo el consumo del recurso hídrico y afectación del medio ambiente por parte de la planta extractora.

Palabras clave: Estación Hidrociclónica, Hidrociclón, Almidón de Yuca, Lechada, Planta Extractora, Eficiencia, Presión, Materia Seca, Sedimentación, Separación, Consumo de Agua.

Abstract

This document describes the development of the project for the implementation and evaluation of two hydrocyclone stations in a cassava starch extraction plant that belongs to the company Deriyuca Ltda., located in the north of the department of Cauca, Colombia.

In the development of this document it is exposed the traditional process of cassava starch extraction, where each subprocess and the approximate water consumption in the extraction plant are explained in order to determine the most suitable place for the installation of the hydrocyclonic stations.

The extractive plant had hydrocyclones that were acquired to increase the efficiency in the sedimentation of starch and to decrease the consumption of water. To make use of this equipment it was necessary to know, in general, the internal operation and geometric characteristics of each hydrocyclone. From this information and the workflows of the plant, the number of hydrocyclones and the configuration for the implementation of the hydrocyclone stations are determined, presenting the necessary materials and the optimum site in the process for their location. In addition, recommendations are made for the control of the parameters before performing the evaluation of the stations.

The design of the experiment for evaluating the stations is performed by establishing the pressure variations, from which the number of samples in each hydrocyclone is determined by each change of pressure. For this case pressures of 50, 70 and 75 psi are established. Sampling data are recorded in the document along with the information of the dry material test made on the samples taken. The statistical analysis for the samples is a completely randomized design (CRD) and was developed with the help of the statistical software Minitab 17.

After the processing of the information in the software, the data analysis was achieved and it was possible to determine the pressure at which the sedimentation stations are more efficient, as well as to identify the hydrocyclones functioning in the starch separation. With respect to the amount of water recovered from this subprocess, the quantity and the place where it can be reincorporated are determined, reducing the consumption of the water resource and the affection to the environment made by the extractive plant.

Keywords: Hydrocyclone station, Hydrocyclone, Cassava Starch, Starch Milk, Extractor Plant, Efficiency, Pressure, Dry Material, Sedimentation, Separation, Water Consume

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) es una especie de raíces amiláceas que es cultivada en los trópicos y subtrópicos. A pesar de ser uno de los cultivos alimenticios más importantes de los países tropicales, fuera de ellos es muy poco conocida. En escenarios experimentales y en monocultivos, la yuca tiene un rendimiento de hasta 90 Tn/ha de raíces (25 a 30 Tn/ha de materia seca); sin embargo, el rendimiento promedio, en condiciones reales (suelos marginales, climas severos y asociación con otros cultivos) es de 9.8 Tn/ha en el mundo (12.4 Tn/ha en América Latina). Con 1 Tn (1000 kg) de yuca fresca se pueden obtener 280 kg de harina limpia, 230 kg de almidón, 350 kg de trozos secos o 170 lb de alcohol (CIAT, 1996).

Uno de los derivados de la yuca es el almidón. Este producto aunque no está fermentado es ampliamente empleado en diferentes industrias. Su obtención en el departamento del Cauca ha sido el resultado de la labor artesanal realizada por familias enteras, principalmente en las áreas rurales y con equipos manuales fabricados por mecánicos locales.

En Colombia, la extracción de almidón de yuca como actividad agroindustrial netamente artesanal inició alrededor de los años 50, y su demanda aumentó en los años siguientes. Para cumplir con dicha demanda se introdujeron innovaciones mecánicas en algunas etapas del proceso y se logró aumentar la capacidad productiva de estas pequeñas fábricas que empezaron a llamarse “rallanderías”. Esta actividad permitió el desarrollo socioeconómico de las familias de escasos recursos que pueblan el norte del departamento del Cauca, Colombia (CECORA, 1988).

En un censo realizado se determinó que en el departamento del Cauca están establecidas aproximadamente 210 rallanderías que producen el 80% del almidón que consume el mercado nacional. Algunas de ellas desarrollan un proceso completamente artesanal mientras que otras ya presentan un grado mediano de mecanización, aunque siguen siendo muy tradicionales. Sin embargo, otras más tecnificadas, permanecen en el nivel de la industria a pequeña escala, pues, su capacidad de proceso es alrededor de $1/2\text{ Tn}$ de yuca por hora (Zakhia et al., 1996).

En este proyecto se presenta una propuesta para la implementación de dos estaciones hidrociclónicas dentro del proceso de producción de almidón de yuca en una rallandería ubicada en el Norte del departamento del Cauca-Colombia, conocida con el nombre de Deriyuca Ltda. Esto con el fin de transferir a los productores rurales una tecnología que mejore la rentabilidad del proceso de extracción y la calidad del almidón que se obtiene, adicionalmente se pretende evaluar las mejoras en la

eficiencia del proceso de separación del almidón de yuca con respecto al agua, mitigando el impacto ambiental por el alto consumo del recurso hídrico.

El uso de tecnologías de separación de suspensiones solido-líquido como el hidrociclón, se ha utilizado recientemente en la industria permitiendo mejorar la producción de diferentes productos debido a su bajo costo de implementación y de mantenimiento; igualmente puede ser considerado como una tecnología limpia debido a la reducción del agua necesaria para realizar la extracción y la posible recirculación de esta, mejorando el proceso de extracción de los sólidos (Svarovsky, 2000). Por tal motivo, el uso de hidrociclones en los procesos industriales de extracción del almidón se hace cada vez más frecuente al poseer una alta capacidad para el procesamiento y un bajo requerimiento de potencia (Saengchana et al., 2009). La implementación de este tipo de equipos en los procesos artesanales, lo cual permitiría ayudar a los productores artesanales de almidón a incrementar su producción y obtener mayores ingresos, logrando de este modo mejorar las condiciones de vida de los productores (Manickavasagan y Thangavel, 2006).

El almidón de yuca es conducido en el sistema por lavado con agua, la cual por lo general al finalizar el proceso termina en el drenaje e incorporándose nuevamente al efluente, lo cual indica que el sistema de producción de almidón de yuca requiere un alto consumo agua, que al salir del proceso termina en los ríos contaminándolos. Para evitar esto, existen algunos tipos de tratamientos que incrementan los costos de producción. Es necesario realizar tratamientos para no enfrentarse a altas cargas comerciales de efluentes basados en la demanda biológica de oxígeno (*DBO*) y demanda bioquímica de oxígeno (*DQO*) de los residuos que se van por el desagüe; en estos casos es de gran importancia recircular el mayor porcentaje de agua al sistema.

La empresa Deriyuca Ltda. posee una planta procesadora de yuca para la extracción de almidón agro (rallandería), llamada La Agustina. Esta se localiza en el Corregimiento de Mondomo, Santander de Quilichao, Norte del Cauca (km 59 vía Cali-Popayán).

El subproceso de separación del almidón de yuca y el agua se lleva a cabo de dos maneras diferentes. El primer método involucra la utilización de un separador ciclónico, el cual incrementa la concentración de almidón en la lechada (agua más almidón y mancha) hasta niveles adecuados para posteriormente hacer que circule por canales de poca longitud, en donde el almidón se separa del agua mediante el proceso de decantación o sedimentación. Una rápida separación del almidón de la lechada y la remoción de impurezas puede llevarse a cabo utilizando la operación de centrifugado que se logra con el hidrociclón, pero dado que el centrifugado no reemplaza completamente lo logrado mediante la sedimentación, se debe emplear el proceso de sedimentación después del centrifugado (Sreenarayana et al., 1990).

En el segundo método no se utiliza ningún separador ciclónico, en cambio se hace circular la lechada con bajas concentraciones de almidón directamente a canales de sedimentación. Este método hace que el proceso sea de larga duración y de manejo poco higiénico, llevando a un producto de baja calidad (Rangaswami, 1993). Para este método se hace necesario que la longitud de los canales sea

mucho mayor en comparación a los canales del primer método, debido a que el almidón de yuca tardará mucho más tiempo en separarse de la gran cantidad de agua mediante el proceso de sedimentación. Además, es necesario tener en cuenta que cuando la lechada de almidón se asienta por más de 6 u 8 horas, esta empieza su fermentación produciendo alcohol y ácidos orgánicos que pueden producir contaminación en las plantas de procesamiento (Radley, 1976).

En la planta La Agustina se emplea el segundo método, por lo que disponen de siete canales interconectados con una longitud total de 175 m. Esta planta facilitará sus instalaciones, para realizar pruebas con dos estaciones hidrociclónicas, las cuales serán instaladas a partir de componentes adquiridos previamente por la empresa Deriyuca Ltda., buscando mejorar la eficiencia en el proceso de separación del almidón de yuca.

En esta planta se han incorporado a través del tiempo nuevas tecnologías para aumentar la producción, alguna de ellas se obtuvieron por convenios con la Universidad del Cauca y el CIAT; sin embargo, los siete canales disponibles no son suficientes para que el proceso sea continuo, pues actualmente se cuenta con lavadoras centrifugas y equipos de mayor eficiencia. Con este proyecto de ingeniería se busca implementar dos estaciones hidrociclónicas para aumentar la concentración de almidón previa al proceso de sedimentación en los canales, disminuyendo así la infraestructura de los canales utilizados, además de reducir el consumo de agua en el proceso de extracción de almidón, reciclando el agua residuo del proceso de separación.

Dado lo anterior, para dar solución al problema de ingeniería se planteó “Implementar dos estaciones hidrociclónicas en una planta extractora de almidón de yuca, evaluando las particiones de almidón, agua y mancha para reducir la longitud y número de canales de sedimentación”.

Para la ejecución del objetivo planteado se propuso desarrollar los siguientes objetivos específicos:

- Definir la configuración y el número de hidrociclones por cada estación, teniendo en cuenta los flujos de trabajo de la planta.
- Implementar y evaluar la configuración de las dos estaciones hidrociclónicas dentro del proceso y determinar los parámetros de trabajo (Flujo másico, concentraciones y particiones de agua, almidón y mancha).
- Determinar el porcentaje (%) de agua que se puede reutilizar y las condiciones de la misma, para identificar en que parte del proceso es viable incorporarla.

Con la incorporación reciente del hidrociclón en los procesos agroindustriales, se ve la necesidad de indagar y analizar más sobre su comportamiento y características apropiadas para que funcione eficientemente. A lo largo de los años algunas personas y entidades han investigado y experimentado con hidrociclones en procesos relacionados con la agroindustria entre ellos podemos encontrar:

En el año de 1995 en la India se evaluaron dos hidrociclones de 25 y 50 mm de diámetro en su sección cilíndrica, con la finalidad de concentrar el almidón en la lechada y reducir el consumo del agua.

Estos hidrociclones fueron fabricados por MOZLEY y analizados con pruebas de laboratorio donde se demostró que con concentraciones de almidón del 4 % y diversos diámetros, se logra la mejor eficiencia de separación en presiones cercanas a 350 *kPa* (50.8 *psi*). Dichas investigaciones fueron hechas por (Trim y Marder, 1995); también se realizaron evaluaciones de hidrociclones en el proceso de extracción de almidón de Yuca en 1994, buscando analizar principalmente el consumo y la contaminación del agua, además de incrementar el rendimiento y la calidad del almidón.

En la última década en Colombia, más exactamente en la Universidad del Valle, han surgido trabajos de grado de estudiantes que se han dedicado a realizar pruebas con hidrociclones implementados en el proceso de la extracción de almidón de Yuca, entre estos podemos encontrar a:

En (Arias, 2006) se realizó una investigación de modelos matemáticos de un hidrociclón en la extracción de almidón de yuca en plantas productoras de almidón en el norte del departamento del Cauca”. Él analizó las variables fluido-dinámicas y geométricas que influyen en la operación del equipo, dando como resultado una mejor eficiencia y comportamiento con hidrociclones de cono alargado, ya que la longitud más prolongada produce que las partículas estén posicionadas más tiempo en el sitio facilitando que se evacuen los sólidos por la salida inferior el equipo.

En (Vélez, 2008), Implementó la separación hidrociclónica en el proceso de extracción de almidón de yuca en las plantas procesadoras de yuca del norte del Cauca” en el año 2008, analizando la reducción del consumo de agua utilizado en dos hidrociclones de 50 *mm* en paralelo y dos de 25 *mm* en serie. Él encontró que la mejor eficiencia de separación se logró con los hidrociclones de 25 *mm*, con un valor promedio de separación del 90 % y reducción en el consumo del agua de un 70 %.

En (REINA, 2011), Implementó hidrociclones en el proceso de extracción de almidón de yuca para la separación almidón-proteína y evaluó la influencia en la calidad del almidón agrio en el año 2011 realizando la instalación de dos estaciones hidrociclónicas en el laboratorio de la Universidad del Valle a nivel experimental y evaluando la eficiencia que estas tenían en el proceso y su afectación en la calidad del almidón.

Este informe se encuentra organizado de la siguiente manera. En el capítulo 2 se presenta la revisión literaria donde se describe el proceso de extracción en la planta procesadora de almidón de yuca, el hidrociclón y las variables de diseño para la separación, además del diseño del experimento para la toma de muestras y análisis de la eficiencia. En el Capítulo 3 se describe los flujos de trabajo en la planta extractora, las características de los hidrociclones y estaciones implementadas, el procedimiento para la toma de muestras y pruebas en el laboratorio, la eficiencia de interés, la importancia de la recirculación del agua en el proceso y el software a utilizar para el procesamiento de los datos. En el Capítulo 4 se muestra la información obtenida de la prueba realizada en el laboratorio y el análisis de los resultados presentados por el software utilizado. En el Capítulo 5 se presentan las deducciones tras el desarrollo de este proyecto y las posibles mejoras para el aumento de la eficiencia, además se sugieren trabajos futuros a partir de los resultados encontrados con este experimento en pro de la eficiencia de la sedimentación de almidón y la recirculación del agua.

Capítulo 2

Revisión de literatura

En este capítulo se describe la planta procesadora de almidón de yuca, la funcionalidad de un hidrociclón y la importancia de las estaciones hidrociclónicas en el subproceso de separación para la extracción de almidón de yuca.

La sección 2.1 presenta la descripción de la yuca. En la sección 2.2 se explican todos los subprocesos que se desarrollan en una planta extractora de almidón de yuca y los equipos que se utilizan para esto.

El funcionamiento y los parámetros propios del diseño de los hidrociclones, la adaptación de estos y configuración en las estaciones hidrociclónicas se muestran en la sección 2.3.

Para la realización del experimento se trabaja con el diseño completamente aleatorizado (*DCA*) explicado en la sección 2.4, necesario para definir el número de muestras y analizar los datos obtenidos a partir de las pruebas en campo y laboratorio.

2.1. Yuca (*Manihot esculenta* Crantz)

Es un tubérculo nativo del trópico americano, también conocido como tapioca o cassava. La yuca ha surgido de un relativo desconocimiento en las últimas décadas para convertirse en la tercera fuente más importante de energía alimentaria del mundo después del arroz y el maíz. Apreciado por los pequeños agricultores por su tolerancia a la sequía y los suelos infértiles, el cultivo es eco-eficiente por naturaleza y brinda una fuente confiable de alimentación, así como ingresos provenientes de los mercados para una amplia variedad de alimentos, forrajes y productos industriales (CIAT, 1967) .

En la actualidad existen más de 5000 variedades de yuca y cada una tiene características propias. Su fruto es dehiscente y las semillas pequeñas y ovaladas. La raíz es cónica y tiene una corteza externa y otra interna (de color blanco o rosado). Los tallos maduros se cortan en estacas de 7 a 30 *cm* de longitud con las cuales se propaga la planta.

La yuca no se debe considerar simplemente como un cultivo para consumo humano, puesto que una parte apreciable de la producción es procesada y puesta en el mercado convertida en almidón y otros productos.

La raíz de la yuca se compone de tres tejidos: el periderma (cascarilla), el parénquima cortical (corteza) y el parénquima interior, los cuales se muestran en la figura 2.1.

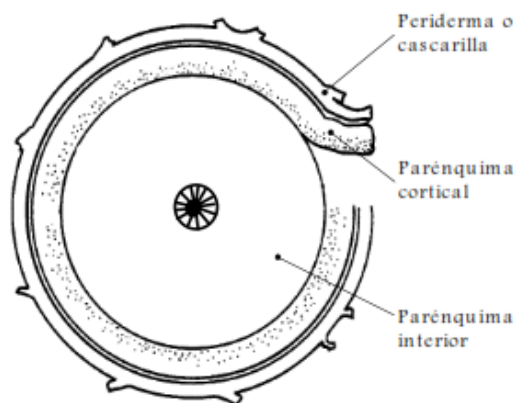


Figura 2.1. Corte transversal de la raíz de yuca

Fuente: (Moreno et al., 2001)

2.2. Proceso de extracción de almidón de yuca en las rallanderías

El departamento del Cauca es el principal productor de almidón de yuca en Colombia ya que procesa casi el 80 % de la producción total del país. Las variedades de yuca más utilizadas en la región son Catumare (CM 523-7) y M Bra 12. Se estima que el 97 % de los productores siembra la yuca según métodos tradicionales.

Las actividades relacionadas con el cultivo y la transformación de la yuca en el norte del departamento del Cauca ocupan un lugar predominante en la economía regional. Representan la fuente principal de ingreso para casi 4000 familias campesinas que manejan las 210 rallanderías de almidón antes mencionadas. Los agricultores de las zonas aledañas a las rallanderías suministran a estas la yuca. (Moreno et al., 2001).

2.2.1. Aprovechamiento de la gravedad

Es conveniente instalar los equipos y las estructuras civiles de la rallandería a diferente nivel. El propósito es aprovechar la gravedad durante las operaciones de carga y descarga de los equipos para disminuir considerablemente la fatiga de los operarios y para incrementar la capacidad de procesamiento de la planta.

2.2.2. Consumo de agua en la rallandería

El alto consumo de agua en las rallanderías del Cauca, en Colombia, se considera un problema serio de la tecnología disponible hoy para la extracción de almidón de yuca. El proceso consume, en promedio, de 15 a 20 m^3/Tn de raíces procesadas. En el Cauca se utilizan de 60 a 90 l de agua por

kilogramo de almidón y en Brasil, donde la tecnología es mejor, se consumen, en promedio, de 15 a 25 l/kg de almidón.

Este problema tiende a agravarse por algunas razones como la escasez de agua en las épocas secas, disminución notable del recurso agua en sus fuentes por la tala actual de los bosques, aumento de la capacidad de procesamiento de las rallanderías (por las mejoras de los últimos años) que procesan actualmente mayor cantidad de raíces y consumen, por tanto, más agua que antes.

La contaminación generada por las aguas residuo del proceso que llevan una carga alta de materia orgánica crea otro problema al consumo del agua. Esas aguas se vierten en los ríos sin ningún tratamiento. Se calcula que las rallanderías del Cauca producen diariamente una carga contaminante de 2000 a 6000 mg de DQO por litro de efluente.

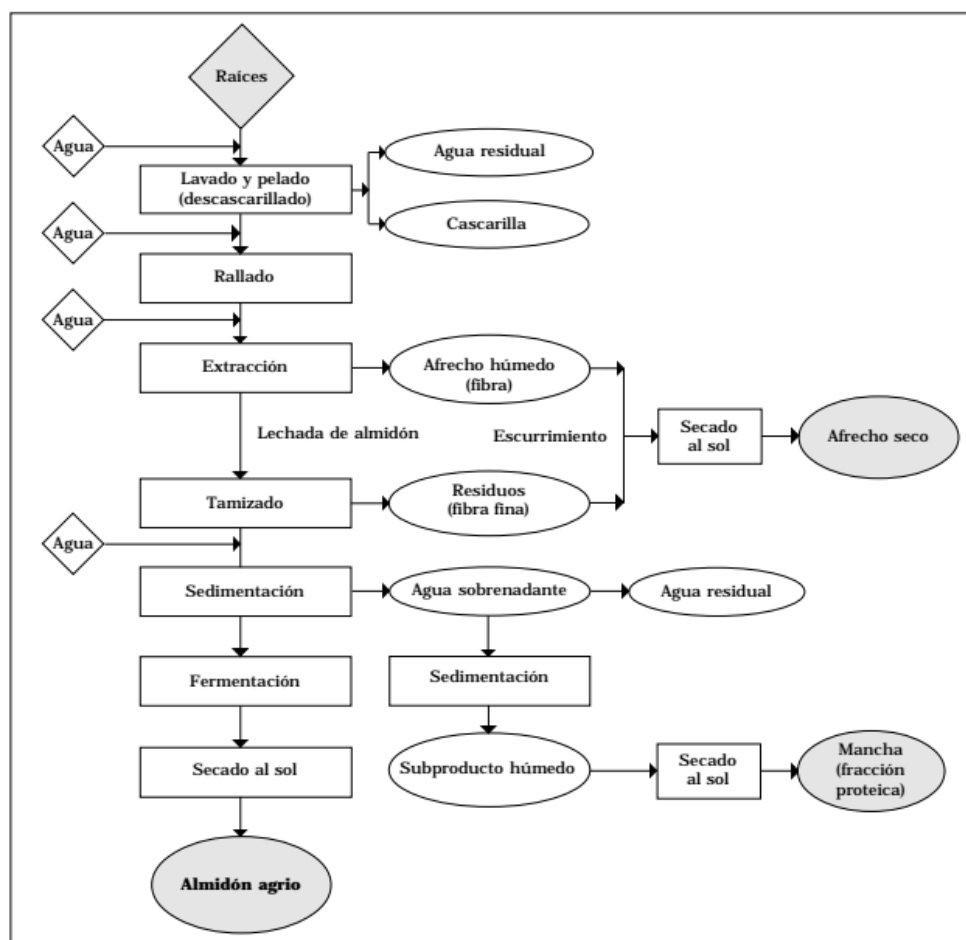


Figura 2.2. Flujograma del proceso de extracción de almidón de yuca
Fuente: (Moreno et al., 2002)

El proceso de conversión de las raíces de yuca en almidón de yuca se ilustra en la figura 2.2. En ella, se muestran los puntos del proceso en que se debe añadir agua y en donde se obtienen los diferentes resultados y residuos del proceso.

Las operaciones de la transformación de la yuca en almidón se componen de la recepción de las raíces, lavado de las raíces, rallado de las raíces, separación de la “lechada de almidón”, tamizado de la “lechada de almidón”, sedimentación, fermentación y secado. Estas se describen en las subsecciones 2.2.3 – 2.2.9.

2.2.3. Recepción de las raíces

Las raíces llegan a las rallanderías, en sacos de 80 a 90 *kg* aproximadamente. Estos sacos se organizan en un área cubierta, con piso de concreto que está localizada cerca de la lavadora de raíces para que la operación de carga de esta máquina cause mínima fatiga a los operarios.

2.2.4. Lavado de las raíces

El operario vacía los sacos que contienen las raíces en la tolva de la lavadora; esta tolva se encuentra en uno de los costados del tambor o cilindro giratorio de la máquina. Las raíces se asperjan con agua dentro del tambor para retirar de ellas la tierra y las impurezas que traen y así facilitar la evacuación de esos residuos. La cascarilla que se encuentra adherida a las raíces, se separa gracias a la fricción de unas raíces con otras y contra la pared interna del cilindro que gira. La cascarilla pasa por los orificios del cilindro y es evacuada junto con las impurezas.

Cuando el operario considera que las raíces están limpias y sin cascarilla, abre la compuerta de retención ubicada en el costado del tambor opuesto a aquél en que está la tolva. Las raíces caen así a un tanque de almacenamiento cuyo fondo tiene una rejilla; este tanque conduce a la tolva del rallador.

El agua de lavado que contiene las impurezas y la cascarilla se recoge en una estructura de mampostería y se conduce por tubería hacia un área de filtración, donde se recupera la cascarilla. Esta se almacena en montones al aire libre para que se descomponga y sirva luego como fertilizante en los cultivos de café, yuca y plátano, principalmente.

2.2.5. Rallado de las raíces

El operario empuja las raíces desde el tanque de almacenamiento ya mencionado hasta la tolva de carga del rallador; por su forma de canaleta, la tolva favorece el movimiento de las raíces entre las dos máquinas. El contacto directo de las raíces contra la superficie rugosa y cortante del tambor del rallador en rotación causa la desintegración necesaria de las células del tejido amiláceo de la raíz para que éstas liberen los gránulos de almidón.

Durante el rallado se hace aspersión con agua de la superficie interna del tambor para lavar permanentemente los elementos cortantes y para conformar una masa acuosa de fácil transferencia hacia la coladora. Un tanque situado debajo del rallo recibe la masa rallada hasta que ésta pasa a la coladora. Este tanque está situado en un nivel superior de la coladora, lo que permite cargar directamente la masa rallada por gravedad.

2.2.6. Separación de la “lechada de almidón”

En esta operación se separan los granos de almidón de la masa rallada (pulpa) mediante un profuso lavado de la pulpa con agua. El operario libera la pulpa que se encuentra en el tanque de almacenamiento y la dirige hacia la canaleta pivotante (o cuchara principal de la coladora) que en la posición de carga permite el flujo de la pulpa hacia el cilindro rotatorio de la coladora. Por medio de una tubería perforada a manera de flauta, se introduce suficiente agua, de manera uniforme y radial, en el interior del tambor; se logra así un buen lavado de la pulpa y, por tanto, una adecuada recuperación del almidón disuelto en la lechada.

La coladora procesa ‘lotes’ de pulpa. La ‘lechada de almidón’ pasa a través de un lienzo colocado en el interior del tambor y, a medida que transcurre el tiempo de colado, sale cada vez más diluida hasta perder por completo su color; en este momento, el operario interrumpe el colado. Enseguida cambia la dirección de la cuchara principal y la coloca en posición de evacuación; los residuos o el afrecho caen entonces en un tanque en forma de embudo de donde son conducidos, por tubería enterrada, a un tanque de escurrimiento. Después de escurrir varios días, estos residuos se extienden, cuando el tiempo lo permite, en patios (sin pavimentar, generalmente) para que se sequen al sol. El afrecho seco se utiliza como componente en raciones para animales.

2.2.7. Tamizado de la ‘lechada de almidón’

La ‘lechada de almidón’ sale de la coladora y fluye hacia un tamiz plano ligeramente inclinado, que ejecuta un movimiento de vaivén. La lechada pasa por los orificios del tamiz, pero las fibras finas, que lograron pasar por la malla de la coladora, son retenidas en él.

Estas fibras se denominan ‘afrechillo’. El vaivén de la operación desplaza el afrechillo hacia un extremo del tamiz, donde es recogido en un conducto que lo lleva al tanque de almacenamiento del afrecho.

2.2.8. Sedimentación

La ‘lechada de almidón’ pasa el tamiz plano de vaivén y es conducida mediante tuberías hacia un laberinto de canales de sedimentación. La sedimentación se basa en el principio de la precipitación selectiva de la suspensión de almidón en movimiento. En un canal determinado, la velocidad del fluido establece el tiempo de retención y debe permitir solamente la sedimentación de los granos de almidón; los materiales más livianos (proteínas, fibras, impurezas, etc.) no se sedimentan y salen con

las aguas residuales. Por consiguiente, para obtener un sedimento limpio de almidón y evitar al máximo las pérdidas de almidón a la salida del canal se ajustan el caudal de la suspensión (la lechada) y la profundidad de la lámina de agua en el canal.

La sedimentación selectiva depende de la densidad de las partículas de la suspensión. Por tanto, permite diferenciar también el almidón según el tamaño de sus granos, a lo largo del canal.

Al comienzo del primer día de trabajo, generalmente, se represa en los canales una lámina de agua de aproximadamente 5 cm de profundidad. Para lograrlo, se superponen tablillas en el extremo del último canal para formar una compuerta de altura variable. Esta agua no tiene un tratamiento adecuado que le permita retirar partículas en suspensión; por tanto, es recomendable añadirla en el último canal del laberinto para que en éste se decanten las impurezas y no se contaminen las primeras secciones del laberinto, en las cuales se deposita el almidón en mayor proporción. A medida que crece la altura de la capa de almidón sedimentado en el primer tramo del primer canal del laberinto, se incrementa igualmente la altura de la compuerta añadiendo más tablillas. Se obtiene así mayor tiempo de retención de la lechada y mejor recuperación de los sólidos suspendidos en ella.

Sobre la capa de almidón sedimentado, principalmente en los últimos tramos del laberinto, alcanzan a decantarse partículas del subproducto conocido como ‘mancha’ la cual, por su menor densidad, sedimenta más lentamente. La mancha es rica en proteína y tiene un color crema amarillento.

Nunca forma una pasta compacta y, por tal razón, se elimina fácilmente de la superficie del almidón haciendo un lavado con agua suficiente hasta que aparezca el característico color blanco intenso del almidón. El agua que sale al final del último canal y que contiene la mancha se lleva a un tanque de sedimentación donde ésta se recupera parcialmente, según la capacidad del tanque. La mancha se escurre luego y se seca al sol para usarla en la alimentación animal.

La operación de sedimentación se realiza en forma continua y durante varios días hasta cuando se llenen los canales (o cuando sea necesario separar diferentes lotes de yuca) y entonces se retira el almidón. Mientras no esté andando el proceso de extracción, durante la jornada, es conveniente que un poco de agua limpia entre en los canales y evite que la mancha del sobrenadante se deposite sobre el almidón. Al principio del día siguiente se debe ‘desmanchar’, o sea, retirar la mancha depositada en la superficie de la masa compacta de almidón; se evita así que el almidón de la nueva lechada sedimente sobre la mancha de la jornada anterior.

El almidón se retira del fondo del canal en forma de bloques que se cortan fácilmente con ayuda de palas metálicas o plásticas. Estos bloques se transportan en baldes hasta los tanques de fermentación.

2.2.9. Secado

El almidón forma una masa muy compacta en los tanques de fermentación. Su contenido de humedad es, aproximadamente, de 55% en base húmeda. Utilizando palas metálicas, se cortan bloques de la

masa de almidón y se transportan a los patios de secado. Algunas plantas extractoras cuentan con un equipo denominado molino quebrador o desmenuzador, que sirve para desintegrar los bloques; así, al exponer al sol el almidón desmenuzado, su tasa de secado es más uniforme. Cuando no hay equipo para quebrar el almidón, los operarios desintegran los bloques desmenuzándolos con las manos y mediante el pisoteo.

El almidón húmedo se seca, generalmente, en patios pavimentados, esparcido sobre láminas de plástico de color negro. La capa de almidón extendida sobre el plástico puede variar de 1.0 a 2.5 kg/m^2 , según la irradiación solar del día. Esta capa debe ser removida frecuentemente con un rastrillo para exponer el producto uniformemente al sol y acelerar el secado.

Cuando el almidón alcanza una humedad de entre 12 y 14 % en base húmeda, se empaca en sacos para comercializarlo.

En la figura 2.3 se muestra una vista de planta de una rallandería organizada, según el proceso de extracción de almidón de yuca descrito anteriormente.

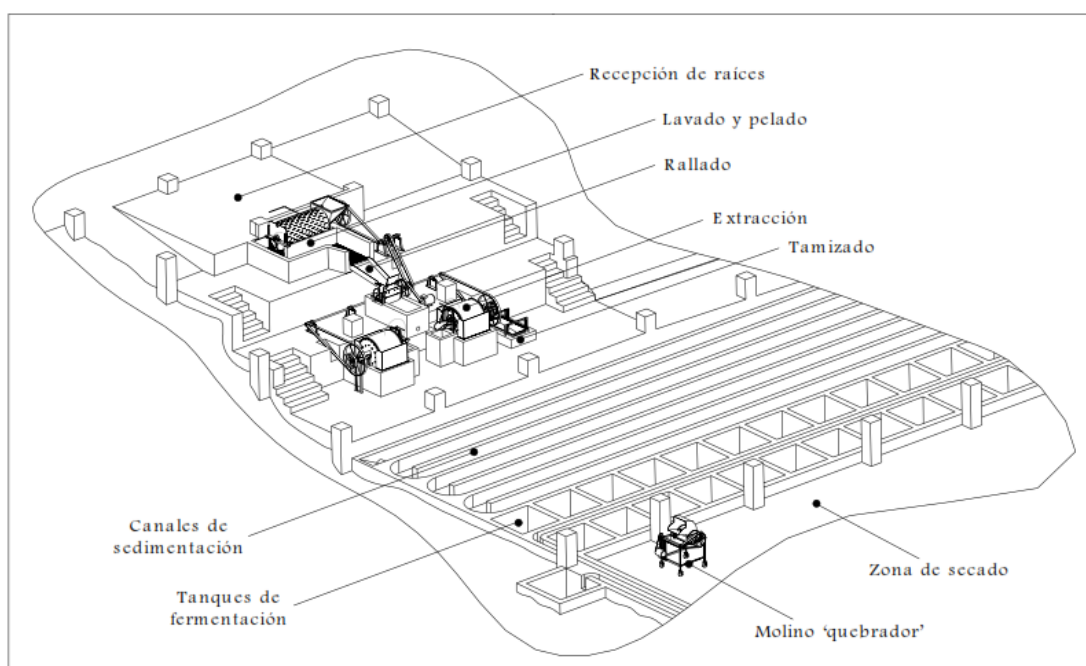


Figura 2.3. Diseño de las Instalaciones de una Rallandería
Fuente: (Moreno et al., 2002)

Según los esquemas del proceso de extracción de almidón de yuca, la fase en la cual se puede introducir los hidrociclones está ubicada entre la coladora y los canales de sedimentación. Los cuales ayudan a concentrar la lechada y recircular el flujo superior hacia la operación de colado (Moreno et al., 2002).

2.3 Descripción del Hidrociclón

Un hidrociclón es un equipo de separación líquido-sólido, cuyo principio de funcionamiento es la fuerza centrífuga apoyada en la diferencia en tamaños de partícula del sólido. Este se compone por:

Una cámara de alimentación en forma cilíndrica perteneciente a la parte superior del cuerpo del hidrociclón, por donde se introduce la mezcla sólido-fluido de forma tangencial en la parte superior de la sección cilíndrica que posee un área de sección rectangular.

Un fondo cónico donde se produce la separación, por el cual baja la mezcla rotando por el ciclón. La trayectoria circular crea un campo de aceleración centrífuga, Si las partículas sólidas son más densas que el líquido, se desplazarán radialmente hacia fuera hasta chocar con la pared del hidrociclón, que hace que descienda y se recoja en la parte inferior del cono o salida. En esta región cónica la longitud genera más tiempo de residencia de las partículas que viajan en el interior del cono facilitando la evacuación del material sólido por la descarga inferior del hidrociclón (Reina, 2011).

Una cámara cilíndrica en donde se desarrolla el “vórtice” (Vortex). Este se origina cuando la fase fluida llega al fondo y esta posteriormente asciende rotando, pues la baja presión la impulsa; el vórtice se ubica concéntrico a la cámara cilíndrica y se extiende por debajo de la entrada de alimentación para minimizar la fuga de partículas gruesas hacia el rebalse.

Dos salidas una superior por donde se evacua el material de menor densidad y otra salida inferior por donde se evacua el material más denso, generalmente con una boquilla que permite la estrangulación del diámetro efectivo de descarga del cono reduciendo el efecto “spray” al salir; ambas salidas se ubican concéntricas a la cámara cilíndrica. Generalmente el hidrociclón se ubica con sus salidas paralelas al eje vertical; aunque mucho se ha discutido sobre la influencia de la posición sobre el desempeño de un hidrociclón, en la práctica se ha demostrado que siempre que la presión de alimentación sea la adecuada esta variable no es influyente (van Esch, 1991) (Trim y Marder, 1995).

La separación hidrociclónica es básicamente una separación por sedimentación acelerada haciendo uso de la diferencia de densidades entre los constituyentes del fluido, pero reemplazando la acción de la fuerza de gravedad gracias a la acción de la fuerza centrífuga, producto de una alimentación tangencial a presión a la cámara cilíndrica en donde se desarrolla el “vórtice” y un fondo cónico donde se produce la separación (Perry y Chilton, 1986).

El principal objetivo de un hidrociclón es poder tratar un determinado caudal de fluido y separarlo eficientemente en dos fracciones, una llamada sobre flujo (*Overflow*) la que debe llevar los elementos más finos y/o elementos menos densos y otra llamada bajo flujo (*Underflow*) la que debe contener los elementos más grandes y/o más densos. En la figura 2.4 se muestra en detalle las partes y el funcionamiento de un hidrociclón.

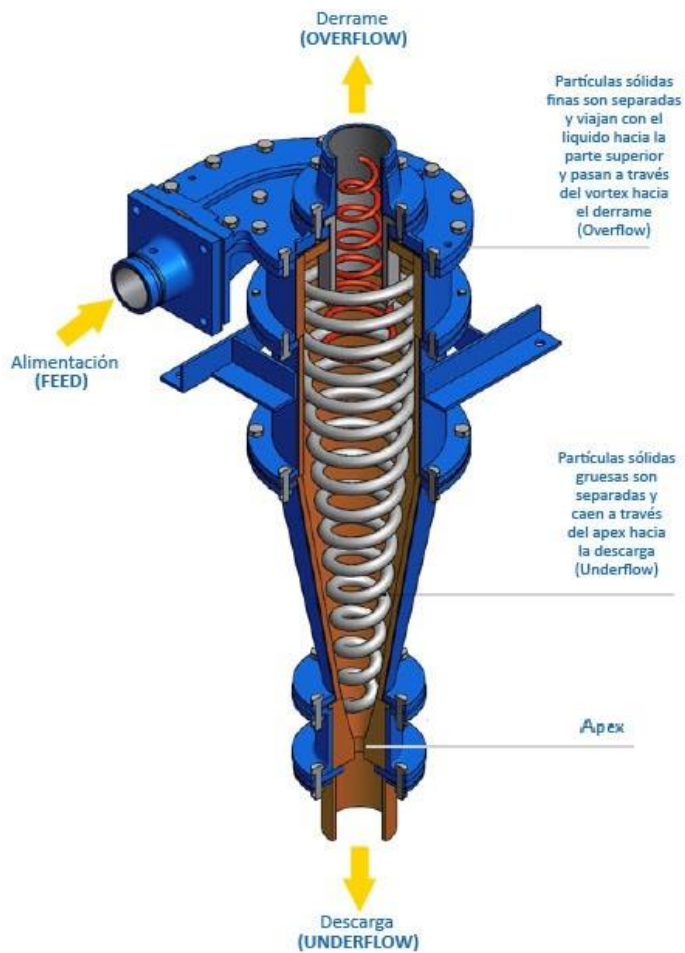


Figura 2.4. Partes principales de un Hidrociclón
Fuente: Hidrociclones, <http://www.icba.com.pe/producto-hidrociclones>

2.3.1. Movimiento de partículas en un hidrociclón

Las fuerzas a las que está siendo sometida una partícula suspendida en el fluido entrante en un hidrociclón, son creadas por campos externos de aceleración, como la aceleración de la gravedad y la aceleración centrífuga. Otro tipo de fuerzas generadas son las de arrastre, creadas por el fluido sobre las partículas. El movimiento de partículas en dirección tangencial y axial son las mismas del fluido, por tanto sus respectivas velocidades son similares. La fuerza centrífuga actúa en dirección radial y ésta a su vez se opone al movimiento del fluido hacia el interior. Si la fuerza centrífuga es mayor a la fuerza de arrastre del fluido, la partícula se moverá en dirección radial hacia las paredes interiores del hidrociclón.

Los valores de las velocidades tanto radiales como tangenciales son fundamentales para determinar el comportamiento de las fuerzas de arrastre y centrífugas respectivamente. Es importante tener en

cuenta que el comportamiento de estas fuerzas influye directamente en la eficiencia y el desempeño del hidrociclón (Svarovsky, 2000).

Los hidrociclones tienen mecanismos de baja complejidad en su manufactura, son económicos, fáciles de instalar y son de bajo mantenimiento; esto los hace llamativos para ser usados en procesos de clarificación, recuperación de sólidos, lavado de sólidos, entre otros.

2.3.2. Consideraciones de diseño y operación en un hidrociclón

Existen diferentes teorías de separación líquido – sólido para realizar el diseño de un hidrociclón. Estas teorías tienen en cuenta las variables referentes a la geometría utilizando diferentes modelos tales como el modelo de regresión, el modelo analítico de flujo o por medio de las simulaciones numéricas del proceso. Sin embargo, el que ha sido más estudiado y que ha mostrado la mayor eficiencia en ajustarse al proceso de separación es el modelo desarrollado a partir relaciones de diferentes números adimensionales (Svarovsky, 2000).

Algunas variables geométricas son: el diámetro del hidrociclón, área de alimentación, el diámetro y longitud del “Vortex finder”, el diámetro del “Underflow”, el ángulo del cono y la altura de la cámara cilíndrica. Como también son importantes las variables que caracterizan al fluido de trabajo (Concentración, densidad y viscosidad del sólido) y las operacionales (Presión de trabajo y flujos en el procesamiento).

En la tabla 2.1 se muestran las variables tanto operacionales como geométricas que se deben tener en cuenta para el diseño del hidrociclón.

Tabla 2.1. Variables operacionales y geométricas del hidrociclón

Operacionales		Geométricas	
Q_f	Caudal volumétrico de la pulpa	D_c	Diámetro del hidrociclón
C_v	Concentración volumétrica sólidos	D_a	Diámetro del Ápex
C_w	Concentración másica de sólidos	D_v	Diámetro del Vortex
ρ_p	Densidad partícula de almidón	D_f	Diámetro de alimentación
ρ_w	Densidad del agua	$H1$	Altura 1
ρ_s	Densidad lechada en alimentación	$H2$	Altura 2
u_s	Viscosidad de la lechada	L_v	Longitud del vortex
V	Velocidad de entrada al hidrociclón	A_f	Área de alimentación
P	Presión de alimentación	α_c	Angulo conicidad

Fuente: (Arias, 2006)

Las variables geométricas son de gran importancia para el diseño de un hidrociclón dado que cuando se incrementa el D_a , D_v y L_v decrece la eficiencia en estos equipos, debido a que con el aumento de estas variables crece la probabilidad de que se succionen partículas densas o grandes por el Overflow (Etayo 2005).

Para la realización del diseño se utilizan algunos números adimensionales, estas relaciones son estudiadas para el modelo matemático de la operación del hidrociclón a partir de los análisis dimensionales. Algunas son: el número de Reynolds (Re) donde se debe tener presente la velocidad de alimentación (V_f), el número de Euler (Eu) y los aspectos geométricos como Longitud normalizada (L_N), Numero de restricción (NR), altura normalizada (Hn), relacionando estos de tal manera que se pueden expresar como una función en términos de las variables de respuesta planteadas (Arias, 2006).

$$Re = \frac{\rho_s * V_f * D_c}{u_s} = \frac{\text{Fuerza Inercial}}{\text{Fuerza Viscosa}} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$Eu = \frac{2 * P}{\rho_s * V_f^2} = \frac{\text{Fuerza de Presión}}{\text{Fuerza Inercial}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$L_N = \frac{D_v^2 + D_a^2}{D_f^2} = \frac{\text{Área de salida}}{\text{Área de entrada}} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

$$N_R = \frac{L_v}{D_c} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$Hn = \frac{H_1 + H_2}{D_c} = \frac{\text{Altura Hidrociclón}}{\text{Diámetro hidrociclón}} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

La siguiente relación entre las variables operacionales es establecida para realizar los cálculos anteriormente descritos.

$$V_f = \frac{4 * Q_f}{\pi * D_c^2} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

El rendimiento de un hidrociclón dado depende de la presión de operación y de los diámetros de los tubos de salida. En general, con una mayor presión de operación se obtiene un mayor rendimiento, y un corte más nítido en un punto de corte más fino (MOZLEY). Sin embargo, en el estudio realizado por (Trim y Marder, 1995), se determinó que sin importar el diámetro de la cámara cilíndrica del hidrociclón, pero teniendo una concentración del 4 % en la alimentación, la mayor eficiencia se presentaba con presiones cercanas a los 50.8 psi, como se menciona en la sección 1.1.

En un hidrociclón con entrada y salidas de tamaño pequeño se presenta una mayor recuperación de sólidos pero a su vez esto repercute en una menor capacidad del mismo. Es recomendable que,

durante la operación del hidrociclón, la salida inferior del hidrociclón se pueda ajustar, de modo que la recuperación de sólidos puede variar dependiendo del grado de apertura, esto debido principalmente al aumento o disminución del caudal de agua que pasa por la misma. Aunque existen relaciones que pueden ayudar a determinar el diámetro con la mejor eficiencia, es importante realizar pruebas experimentalmente y verificar si las medidas se ajustan a lo esperado.

Los diámetros típicos de un hidrociclón varían entre los 10 mm y 2.5 m con tamaños de corte entre 2 y 250 μm . El porcentaje de recuperación de sólidos en la salida inferior depende del tamaño y del diseño de la unidad y de las condiciones de operación en cada caso.

2.3.3. Configuración de múltiples hidrociclones

En los procesos de separación en la industria el uso de un hidrociclón puede ser suficientemente efectivo en la separación de sólidos-líquidos, sin embargo puede ocasionar restricciones en términos de capacidad y eficiencia en la recuperación de sólidos. Por esta razón los hidrociclones no son implementados como unidades aisladas sino, en su gran mayoría, como un conjunto de hidrociclones conectados en serie o en paralelo. El tipo de configuración depende del propósito del dispositivo, con lo cual se busca una mejora sustancial en la eficiencia de separación.

Hidrociclones en serie

Cuando la concentración de sólidos es tan alta que un solo hidrociclón no puede realizar una separación óptima, es conveniente adicionar un segundo o tercer hidrociclón en serie con el primer hidrociclón, creando nuevas etapas de separación tal y como se muestra en la figura 2.5. Comúnmente se denominan las etapas individuales de la configuración en serie como etapa primaria, secundaria y terciaria o primera, segunda o tercera etapa.

La configuración de hidrociclones en serie es vinculada en procesos para minimizar la emisión de partículas o minimizar las pérdidas de sólidos costosos. La configuración más común en serie son dos o en algunos casos tres hidrociclones, estas son ideales para la recuperación de sólidos, generando salidas de Underflow con la mayor parte de sólidos y salidas de Overflow con flujos libre de sólidos. Los hidrociclones configurados en serie pueden modelarse utilizando las mismas ecuaciones de un solo hidrociclón, sin embargo es necesario conocer la distribución de concentración y tamaño de los sólidos en la entrada de alimentación de la segunda y tercera etapa para predecir la eficiencia de separación (Buriticá, 2011).

En el caso de algunas industrias que emplean ciclones, la etapa primaria es llamada ciclón de primer corte, a pesar del hecho de que su eficiencia global (surge principalmente de la alta carga de masa al ingreso) normalmente excederá enormemente la eficiencia de las etapas posteriores. Como se ve en la figura 2.5, la salida superior de la etapa primaria se convierte en la entrada de la segunda etapa y así sucesivamente, de modo similar al comportamiento de los hidrociclones.

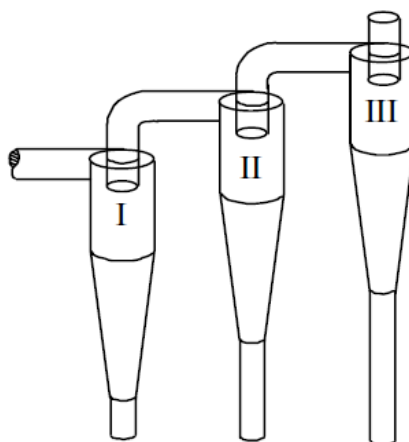


Figura 2.5. Ciclones en configuración serie
Fuente: (Hoffmann y Stein, 2008)

En los ciclones se demostró que en regeneradores de cracking catalítico fluido dos etapas de ciclones pueden tener una eficiencia de incluso 99.99% (Yang, 2003).

En algunos casos puede ser mejor utilizar un ciclón de alta eficiencia y no utilizar una configuración de ciclones en serie. Esto ocurre cuando el ciclón de la etapa primaria es muy eficiente y los sólidos que fluyen hacia la etapa secundaria son muy pequeños y cohesivos, pues los sólidos cohesivos son difíciles de transferir y pueden causar que los sólidos no fluyan en absoluto.

Hidrociclones en Paralelo

La configuración en paralelo es utilizada cuando se requieren fuerzas centrífugas extremadamente altas y/o un solo hidrociclón no tiene la capacidad de recibir en la alimentación el flujo másico del proceso. Es difícil garantizar la igualdad de distribución de líquido y sólidos en este tipo de configuración, esto puede dar lugar a ineficiencias del hidrociclón y un mayor desgaste de los hidrociclones que toman la mayor parte del flujo de sólidos. El aumento de la caída de presión a través de los hidrociclones mejora la distribución de los sólidos, pero no siempre es suficiente para garantizar la igualdad de los sólidos que fluyen en cada uno. Usualmente, cuando el número de hidrociclones paralelos es pequeño (menos de 6 a 8), cada uno tendrá un conducto de entrada y salida individual como se muestra en la figura 2.6.

Por la similitud que presentan los ciclones con los hidrociclones, se encuentran diversos estudios donde determinan que una configuración en paralelo tiene una eficiencia de separación aproximadamente igual a la de un solo ciclón de mayor tamaño. Existe muy poco trabajo en la literatura sobre el funcionamiento de los ciclones paralelos, sin embargo los trabajos encontrados indican que una presión de entrada muy baja conlleva a una distribución de sólido y líquidos muy baja.

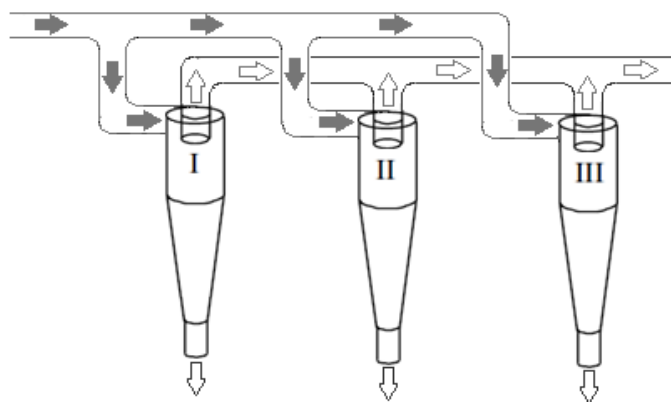


Figura 2.6. Hidrociclones en configuración paralelo
Fuente: propia

(Broodryk y Shingles, 1995) estudiaron el funcionamiento de ciclones en paralelo utilizando los ciclones en una cubierta de francobordo por encima de un lecho fluidizado turbulento. Encontraron que una caída de presión global demasiado bajo (causada por una velocidad de entrada de gas menor a 15 m/s) resulta en un arrastre de sólidos inconveniente y la reducción de la eficiencia de dos de tres ciclones en el experimento.

(Koffman, 1953) estudió la eficiencia de diversas configuraciones de ciclones paralelos de diámetro pequeño (38 - 51 mm de diámetro), cuyos resultados se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Eficiencias de ciclones en paralelo

Configuración	Eficiencia %
Ciclón individual	96.0
Siete ciclones en paralelo (individual hoppers)	95.3
Siete ciclones en paralelo (common hopper)	94.1
Catorce ciclones en paralelo (common hoppers)	92.2

Fuente: (Hoffmann y Stein, 2008)

Los datos muestran que la colocación de los ciclones en una tolva común reduce la eficiencia de recolección, y que la adición de más ciclones a una tolva común también causa una reducción en la eficiencia. (O'Mara, 1950) reportó muy poca diferencia entre la operación con un solo ciclón y con ciclones paralelos. Estos resultados indican que los ciclones paralelos pueden ser diseñados y operados con la misma eficiencia como un solo ciclón, pero que es necesario realizar un buen diseño y mantenimiento de los ciclones para lograr esto (Hoffmann y Stein, 2008).

Estaciones Hidrociclónicas

Las estaciones hidrociclónicas están compuestas por varios hidrociclones, los cuales pueden tener diferentes dimensiones y ser configurados en serie o paralelo, según las necesidades en la separación. Comúnmente, se le denomina batería hidrociclónica a una gran cantidad de hidrociclones individuales configurados en serie para ahorrar espacio, esto se hace especialmente necesario cuando se ha elegido hidrociclones relativamente pequeños para granulometrías pequeñas.

El hidrociclón ha sido una parte fundamental en el proceso de innovación de las rallanderías, las cuales están adoptando tecnologías para aumentar la eficiencia en sus procesos. Partiendo de los esquemas del proceso de extracción de almidón de yuca, la fase en la cual se puede introducir hidrociclones, está ubicada entre la Coladora y los Canales de Sedimentación, para concentrar la lechada y recircular el flujo superior hacia la operación de colado, como se muestra en la figura 2.7.

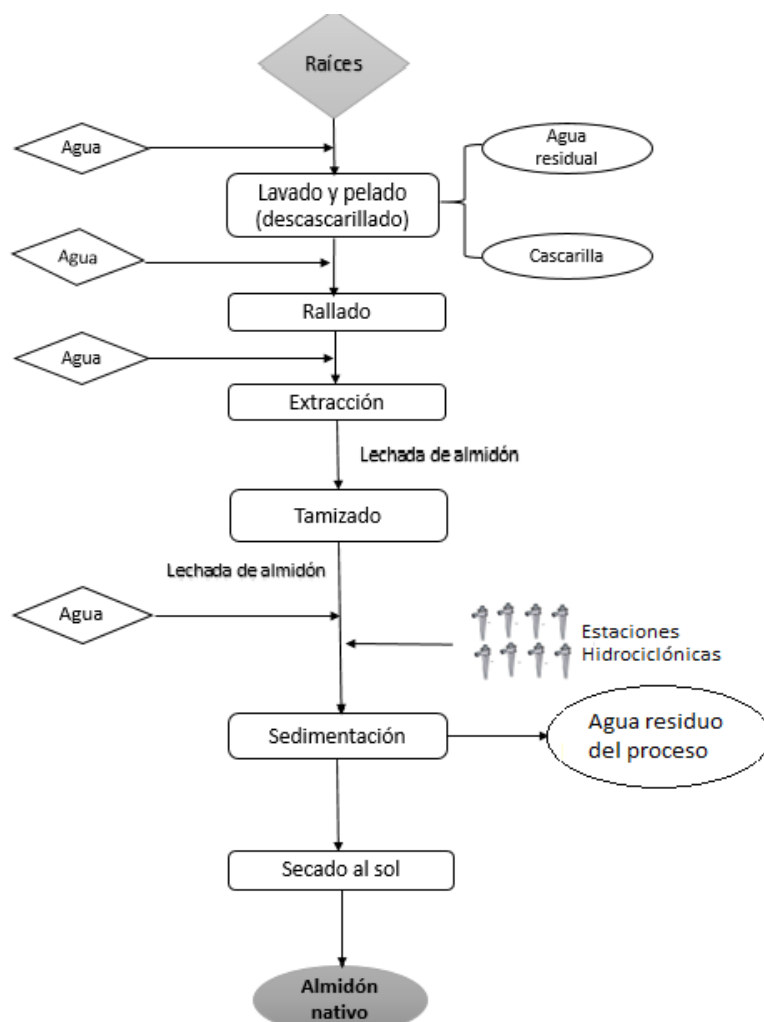


Figura 2.7. Esquema de operación del proceso de producción de almidón de yuca con el uso de hidrociclón
Fuente: Propia

2.4 Diseño de Experimentos

Diseñar estadísticamente un experimento es realizar una o varias pruebas con el fin de caracterizar las variables explicativas que tienen mayor influencia en un ensayo de interés, analizando cómo se ven afectadas una o más variables de respuesta ante cambios controlados en las variables explicativas del proceso o factores. Además, se busca disminuir el efecto de las variables que no se pueden controlar (covariables) para estabilizar y minimizar la variabilidad de las respuestas (López y Melo, 2007).

El diseño de experimentos es usado comúnmente en el campo científico, donde resulta normalmente la formulación de hipótesis, las cuales para ser aprobadas o rechazadas deben sustentarse por observaciones que resultan de metodologías apropiadas ya concretadas en técnicas estadísticas (Mendoza y Bautista, 2002); con estas se puede representar y analizar el comportamiento del escenario estudiado y obtener resultados válidos (Santiago y Díaz, 2016).

A continuación, se definen algunas variables importantes en el diseño de experimentos.

El *Tratamiento* (t) es la mezcla determinada de los niveles de los factores a estudiar, es decir que el tratamiento son las condiciones que se desean comparar durante el experimento. En un diseño con un solo factor son los distintos niveles que hay para dicho factor y en un diseño con varios factores es las distintas combinaciones de niveles de los factores.

La *Unidad Experimental* (UE) es una unidad material sobre la cual se aplica un tratamiento, es la división más pequeña del material experimental. La UE es delimitada y es donde se efectúan las mediciones estadísticas. Está sujeta al costo, manejo, disponibilidad del material, etc. (Ibáñez B. 2009).

El *Error Experimental* (EE) es quien describe el contraste en los resultados producidos por dos o más unidades experimentales que reciben un tratamiento igual. Según (Ibáñez B. 2009) el error experimental “es el grado de varianza o variabilidad o cantidad de variación que existe entre las observaciones o repeticiones de un mismo tratamiento”.

La *Significancia estadística* (α) es la diferencia entre un estadístico de muestra y un valor hipotético, demostrando la baja probabilidad de que una prueba de hipótesis haya ocurrido. La forma de evaluar la significancia estadística es examinando el valor p de la prueba; cuando el valor de p es menor de un nivel de α que esta entre 0.010, 0.05 o 0.01, se puede decir que la diferencia es estadísticamente significativa y se rechaza la hipótesis nula de la prueba (Manual Minitab 17).

Se pueden encontrar diversas teorías que ayudan a escoger un modelo estadístico adecuado teniendo en cuenta los intereses a estudiar en el experimento. Algunas de estas teorías son el diseño de bloques completamente al azar, el diseño factorial, el diseño completamente al azar o aleatorizado, entre otros.

Para este caso en particular se va a implementar el diseño completamente aleatorizado (*DCA*) que se describe a continuación.

2.4.1 Diseño Completamente Aleatorizado o Completamente al Azar (DCA)

El Diseño Completamente al Azar, es aquel en el cual los tratamientos son asignados en forma aleatoria a las unidades experimentales o viceversa, sin ninguna restricción; por lo tanto, se considera que es un diseño eficiente cuando las UE de los que se dispone son muy homogéneas (es decir que tiene en principio igual capacidad de respuesta) y cuando solo se tiene como factor de clasificación los tratamientos y la asignación de estos a las UE. Debido a su simplicidad, el *DCA* es usado frecuentemente (López y Melo. 2007).

El *DCA* no ejerce ningún control sobre el error experimental y requiere que su variabilidad antes de iniciar el experimento sea mínima. Esta característica se constituye en la principal condición para utilizar este tipo de diseño. Algunas de las características de este diseño son:

Los tratamientos se distribuyen en forma aleatoria en todas las unidades experimentales, y el número de repeticiones o unidades por tratamiento puede ser igual o diferente, es decir, cada unidad experimental tiene la misma probabilidad de recibir cualquier tratamiento.

Este diseño es útil cuando las unidades experimentales tienen una variabilidad uniformemente repartida.

El diseño completamente al azar proporciona el máximo número de grados de libertad para la estimación del error experimental; además, no requiere estimar datos faltantes, es decir, el diseño puede analizarse con diferente número de repeticiones por tratamiento.

El diseño supone que si se tiene $n = tr$ (donde t es el número de tratamientos y r el número de repeticiones) UEs homogéneas, entonces se pueden dividir las unidades experimentales dentro de t conjuntos de r unidades cada uno, además cada UE tiene igual probabilidad de asignación a cualquiera de los conjuntos de tratamientos.

2.4.2. Análisis de Varianza o ANOVA

Análisis de varianza

El análisis de varianza (ANOVA) es el encargado de probar la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son las mismas; valoran la importancia de uno o varios factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores. Existe la hipótesis nula la cual dicta que todas las medias de la población (de los niveles de los factores) son iguales y la hipótesis alternativa establece que por lo menos una es distinta (López y Melo, 2007).

En la elaboración de un ANOVA, es necesario tener una variable de respuesta continua y por lo menos un factor categórico con dos o más niveles. Los análisis ANOVA requieren datos de poblaciones que tengan una distribución aproximadamente normal y las varianzas sean iguales entre los niveles de los factores. A pesar de esto, los procedimientos de ANOVA funcionan muy bien incluso cuando se quebranta el supuesto de normalidad, a menos que una o más de las distribuciones sean muy asimétricas o si las varianzas son bastante diferentes. Las transformaciones del conjunto de datos original pueden corregir estas violaciones (Manual Minitab 17). Los ANOVA no son un método fijo, este se adapta a cada diseño particular.

El modo de seleccionar los niveles de los factores determina también el tipo de análisis. Cuando los niveles son fijos o fueron escogidos con anterioridad por el o los investigadores, se habla del modelo I de ANOVA o modelo de efectos fijos. Si los niveles son seleccionados al azar de un grupo grande (población), se aplica el modelo II o modelo de efectos aleatorios, también llamado modelo de componentes de varianza. Existe también el modelo III o modelo mixto que es usado cuando hay factores con niveles fijos y factores con niveles aleatorios en el experimento (López y Melo, 2007).

Para la aleatorización de las UE en un DCA se puede tener $S = \frac{N!}{(r!)^t} = \frac{(tr)!}{(r!)^t}$ posibles planes.

En la tabla 2.3 se muestra la estructura para el ingreso de los datos para el ANOVA, con una vía de clasificación, donde se registran las réplicas y los niveles del factor.

Tabla 2.3. Estructura de registro de los datos para un ANOVA a una vía de clasificación.

Niveles del factor A (tratamientos)							
Réplicas	1	2	...	i	...	t	
1	y_{11}	y_{12}	...	y_{i1}	...	y_{t1}	
2	y_{12}	y_{22}	...	y_{i2}	...	y_{t2}	
.	
.	
j	y_{1j}	y_{2j}	...	y_{ij}	...	y_{tj}	
.	
.	
r_i	y_{1r1}	y_{2r2}	...	y_{iri}	...	y_{trt}	
Total	$y_{1\bullet}$	$y_{2\bullet}$	...	$y_{i\bullet}$	...	$y_{t\bullet}$	$y_{\bullet\bullet}$
Observ.	r_1	r_2	...	r_i	...	r_t	n
Medias	$\bar{y}_{1\bullet}$	$\bar{y}_{2\bullet}$	...	$\bar{y}_{i\bullet}$	...	$\bar{y}_{t\bullet}$	$\bar{y}_{\bullet\bullet}$

Donde

y_{ij} = j-ésima replicación asociada al i-ésimo tratamiento.

El punto como subíndice indica que se suma sobre el subíndice que esa reemplazando, por ejemplo, $y_{i\bullet} = \sum_{j=1}^{r_i} y_{ij}$, $y_{\bullet j} = \sum_{i=1}^t y_{ij}$, $\bar{y}_{1\bullet} = \sum_{j=1}^{r_1} y_{1j}$, $\bar{y}_{\bullet j} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t y_{ij}$ y $y_{\bullet\bullet} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^t \sum_{i=1}^{r_i} y_{ij}$ con $n = \sum_{j=1}^t r_i$.

El modelo estadístico de un DCA (efectos fijos y un factor) es representado por:

$$y_{ij} = \mu_i + \alpha_i + \epsilon_{ij} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde

$i = 1, \dots, t$ (Tratamientos)

$j = 1, \dots, r_i$ (Número de réplicas en el tratamiento i-ésimo)

μ_i es la media de la población i-ésima

ϵ_{ij} es el error experimental aleatorio asociado a la observación

y_{ij} y α_i mide el efecto producido por el tratamiento i-ésimo.

Para hacer estimaciones y pruebas de hipótesis sobre los parámetros μ_i y α_i es necesario que los errores ϵ_{ij} sean independientes y tengan distribución normal $N(0, \sigma^2)$, que cada tratamiento defina una población con distribución normal $N(\mu_i, \sigma^2)$, la varianza σ^2 sea constante e igual para todos los tratamientos (varianzas homogéneas), que la media μ_i para el tratamiento i pueda descomponerse como $\mu_i = \mu + \alpha_i$, y que $\sum_{i=1}^t r_i, \alpha_i = 0$ para estimar los parámetros μ_i .

DCA mediante modelo superparametrizado

La hipótesis del análisis de varianza de una vía de clasificación y efectos fijos, describe la comparación de la igualdad de efectos de tratamientos es decir, $H_0: \alpha_i = \dots = \alpha_t$ versus H_a : al menos un par de α_i 's es diferente ($i = 1, \dots, t$). Si $n = \sum_{j=1}^{r_i} r_i$ tenemos la matriz de proyección de la ecuación 2.8.

$$P_X = X(X^t X)^{-1} X^t \text{BloqDiag} \left(\frac{1}{r_i} J_{r_i \times r_i} \right) \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde

$X = [1_n : \text{Diag}(1 \ r_i)]$, donde 1_n es un vector de unos de tamaño n ,

$(1 \ r_i)$ es un vector de unos de tamaño r_i ,

$J_{r_i \times r_i}$ es una matriz de orden $r_i \times r_i$.

Los resultados anteriores llevan a:

$$P_X Y = [\bar{y}_{1\bullet}, \dots, \bar{y}_{1\bullet}; \bar{y}_{2\bullet}, \dots, \bar{y}_{2\bullet}; \dots; \bar{y}_{t\bullet}, \dots, \bar{y}_{t\bullet}]^T$$

Siendo cada uno de los $\bar{y}_{1\bullet}$ es un vector de tamaño r_i , $i = 1, \dots, t$,

$$P_{\alpha}Y = [\bar{y}_{1\bullet} - \bar{y}_{\bullet\bullet}, \dots, \bar{y}_{1\bullet} - \bar{y}_{\bullet\bullet}; \dots; \bar{y}_{t\bullet} - \bar{y}_{\bullet\bullet}, \dots, \bar{y}_{t\bullet} - \bar{y}_{\bullet\bullet}]^T$$

$$X\Theta = [\mu + \alpha_1, \dots, \mu + \alpha_1; \dots; \mu + \alpha_t, \dots, \mu + \alpha_t]$$

En un análisis de varianza se inicia en la partición de la suma de cuadrados corregida por la media en dos sumas de cuadrados (SC) independientes: Una, corresponde a la variabilidad entre los tratamientos y la otra, a la variación dentro tratamientos como se muestra en las ecuaciones 2.9 y 2.10 (López y Melo, 2007).

$$\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^{r_i} (y_{ij} - \bar{y}_{\bullet\bullet})^2 = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^{r_i} (\bar{y}_{i\bullet} - \bar{y}_{\bullet\bullet})^2 + \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^{r_i} (y_{ij} - \bar{y}_{i\bullet})^2 \quad \text{Ecuación 2.9}$$

$$Y^T \left(I - \frac{1}{n} J_{n \times n} \right) Y = Y^T \left(P_X - \frac{1}{n} J_{n \times n} \right) Y + Y^T (I - P_X) Y \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Que es equivalente a $SCT = SCT_{ra} + SCE$

SCT : Suma de cuadrados total

SCT_{ra} : Suma de cuadrados del tratamiento

SCE : Suma de cuadrados del error

La forma matricial de la SC de los tratamientos corregida por la media, puede escribirse como:

$$SCT (\bar{y}_{1\bullet}, \dots, \bar{y}_{t\bullet}) = Y^T P_{\alpha} Y$$

Las suma de cuadrados tienen inscrito un numero de grados de libertad (GL) cada una. Si se divide cada suma de cuadrados por sus GL, resultan las estimaciones de varianzas. En el ANOVA estas varianzas son distinguidas como cuadrados medios. (López y Melo, 2007).

En este modelo se satisface que

$$E(CME) = E\left(\frac{SCE}{n-t}\right) = \sigma^2$$

Donde

CME : cuadrados medios esperados .

$E(CME)$: cuadrados medios esperados en función del efecto.

El CME es un estimador insesgado de la varianza del error, y tambien

$$E(CMT_{ra}) = \sigma^2 + \frac{1}{t-1} \sum_{i=1}^t n_i \alpha_i^2 + \frac{1}{t-1} \Theta^t X^t \left(P_X - \frac{1}{n} J_{n \times n} \right) X \Theta$$

Donde

CMT_{ra} : Cuadrados medios del tratamiento

CM : Cuadrados medios

Cuando el efecto de α_i es cero entonces $\sum_{i=1}^t r_i \alpha_i^2 = 0$ y el CMT_{ra} estima a σ^2 ; Con una hipótesis nula, el cociente F es igual a la unidad, pero si algún α_i no es igual a cero entonces $F > 1$ (el CMT_{ra} es mayor al CME). Si el valor de F es cercano a la unidad quiere decir que los α_i son cero o muy pequeños lo que muestra que los tratamientos pueden suponerse iguales y no se rechazaría $H_0: \alpha_i = \alpha_2 = \dots = \alpha_t$. Por otro lado, si F tiene un valor grande indica que algunos α_i son distintos de cero y existiría rechazo de H_0 (López y Melo, 2007).

La tabla 2.4 y 2.5 resume el análisis de varianza, teniendo en cuenta los grados de libertad de t y del error, la suma de cuadrados SC y el CME estimador insesgado de la varianza del error y las causas de variación (C.deV.)

Tabla 2.4. Análisis de varianza.

C.deV.	GL	SC	E(CM)
	1	$Y^t \left(\frac{1}{n} J_{n \times n} \right) Y = \frac{Y_{..}^2}{n}$	$\sigma^2 + \theta^t X^t \frac{1}{n} J_{n \times n} X \theta$
Tratam.	$t - 1$	$Y^t [PX - \frac{1}{n} J_{n \times n}] Y = \sum_{i=1}^t r_i (\bar{y}_{1.} - \bar{y}_{..})^2$	$\sigma^2 + \frac{1}{t-1} \theta^t X^t \left(PX - \frac{1}{n} J_{n \times n} \right) X \theta$
Error	$n - t$	$Y^t [I - PX] Y = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^{r_i} (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2$	σ^2
Total	n	$Y^t Y = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^{r_i} y_{ij}^2$	

Tabla 2.5. Análisis de varianza corregido por la media.

C.deV.	GL	SC	CM	F
Tratam.	$t - 1$	SCT_{ra}	$CMT_{ra} = \frac{SCT_{ra}}{(t - 1)}$	$\frac{CMT_{ra}}{CME}$
Error	$n - t$	SCE	$CME = \frac{SCT_{ra} SCE}{(N - 1)}$	
Total	$n - 1$	SCT		

Componentes de la varianza

Los encargados de establecer el procedimiento que debe aplicarse en el análisis son los tratamientos o niveles del factor. Si los tratamientos son fijos o fueron elegidos gracias a su importancia, disponibilidad o practicidad en el manejo, el modelo I es el apropiado. Para este modelo los parámetros son generalmente las medias de los tratamientos y la finalidad es la comparación y estimación de estos promedios. Cuando los niveles del factor corresponden a una población, a la que se le extrajo una muestra tomada aleatoriamente, se tiene el modelo II.

La varianza es el principal parámetro de interés y la finalidad es estimar sus magnitudes absolutas y relativas. El ANOVA, en este modelo, permite concluir sobre la presencia de una componente de varianza aplicable al factor en estudio y se tendría un verdadero análisis de varianza. (López y Melo, 2007).

Utilizando la ecuación 2.7 del modelo estadístico de un DCA, en el modelo II los efectos α_i son variables aleatorias y en el modelo I los efectos α_i son parámetros. Para estudiar este diseño es necesario imponer las restricciones mostradas a continuación:

Los efectos α_i son variables aleatorias independientes con distribución normal,
 $N(0, \sigma_A^2)$,
 Los errores ϵ_{ij} son variables aleatorias independientes con distribución normal
 $N(0, \sigma_C^2)$,
 α_i y ϵ_{ij} son variables aleatorias independientes entre sí.

Ambos modelos (de efectos fijos y aleatorios) utilizan la misma tabla ANOVA, por lo tanto, los cálculos de las sumas de cuadrados como la prueba F de significancia son igualmente válidos.

Las hipótesis del ANOVA para el modelo II se plantean como

$H_0: \sigma_{\alpha_i}^2 = 0$ (No hay variabilidad entre los niveles del factor α_i).

$H_1: \sigma_{\alpha_i}^2 > 0$ (La variabilidad entre los niveles es significativa).

La tabla 2.6 presenta el análisis de varianza asociado al modelo lineal propuesto por la ecuación 2.7.

Tabla 2.6. ANOVA a una vía para efectos aleatorios.

C.deV.	GL	SC	CM	$E(CM)$	$F_{calculada}$
Factor α_i	$t - 1$	SCA	CMA	$\sigma^2 + r_0 \sigma_A^2$	$\frac{CMA}{CME}$
Error	$n - t$	SCE	CME	σ^2	
Total	SCT	$n - 1$			

$$\text{Con } r_0 = \frac{n - \sum_{i=1}^t \frac{r_i^2}{n}}{t-1} \text{ y } n = \sum r_i.$$

Donde

CMA : Cuadrados medios del factor.

Si $F_{calculada} > F_{tabulada} = F_{(V_1, V_2, \alpha)}$, se rechaza H_0 . La regla de decisión es la misma del modelo I, pero la conclusión es diferente. $F_{(V_1, V_2, \alpha)}$ es la F de la Tabla de Fisher donde $\alpha = 0.05$.

Los estimadores del análisis de varianza para determinar las componentes σ_{ϵ}^2 y σ_A^2 , se muestran en las ecuaciones 2.11 y 2.12.

$$\hat{\sigma}_{\epsilon}^2 = CME \quad \text{Ecuación 2.11}$$

$$\hat{\sigma}_A^2 = \frac{CMA - CME}{r_o} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Si los supuestos del modelo II se satisfacen, la varianza de cada observación y_{ij} puede expresarse mediante dos componentes dadas por los términos de la suma $\sigma_y^2 = \sigma_{\alpha_i}^2 + \sigma_{\epsilon}^2$.

2.4.3. Prueba Post-ANOVA

Son aquellas que, mediante las pruebas de hipótesis, ayudan a identificar cuáles de los tratamientos utilizados en el experimento son similares o diferentes al contrastarlos entre dos o más de ellos, es decir, entre cuales tratamientos existe significancia estadística. Una vez implementada la ANOVA tras concluir que existen diferencias significativas entre los tratamientos estudiados, se realiza la prueba post-ANOVA. Algunas de estas pruebas son la prueba de comparaciones múltiples de Bonferroni, prueba múltiple de Duncan, prueba de *LSD*, entre otras. (Montgomery, 2004).

Prueba de Contrastes

Los contrastes se refieren a pruebas de hipótesis para las combinaciones lineales de los tratamientos, se usan con el fin de comparar medias o efectos entre los tratamientos. Una prueba de contrastes es la prueba *F*, el cual se ha desarrollado partiendo de la teoría del diseño de experimento completamente al azar con submuestras y del *DBCA* con submuestras realizado por López y Melo (2007); las hipótesis planteadas para esta prueba son:

$$H_0: \sum_{i=1}^t c_i \mu_i \dots = 0$$

$$H_1: \sum_{i=1}^t c_i \mu_i \dots \neq 0$$

Donde:

$$\sum_{i=1}^t c_i = 0$$

Donde:

C_i : Contraste

Prueba F

El estadístico está dado por:

$$F_{calculado} = \frac{(\sum_{i=1}^t c_i \bar{y}_i)^2}{CME \frac{\sum_{i=1}^t c_i^2}{bcrn} ME}$$

La hipótesis nula se rechaza si

$$F_{calculado} > F_{tabulado} = F_{(\alpha, 1, abc(r-1))}$$

Donde:

$F_{(\alpha, 1, abc(r-1))}$ es la F tabulada de la tabla de Fisher.

Prueba p

La prueba p es utilizada para determinar si los resultados son estadísticamente significativos. Los valores p suelen utilizarse en las pruebas de hipótesis, donde es posible rechazar la hipótesis nula (H_0), es decir, este valor mide la probabilidad de que no se presente la H_0 . El valor de p oscila entre 0 y 1 y es comparado con el nivel de significancia (α) para decidir si se debe rechazar la hipótesis nula (H_0) (Manual Minitab 17).

Si el valor $p \leq \alpha$, se rechaza H_0 , por el contrario cuando el valor $p \geq \alpha$, no se puede rechazar H_0 .

Para α suele utilizarse un valor de 0.05, entonces, si el valor $p \leq 0.05$, se debe rechazar H_0 .

Prueba de Comparación Múltiple de Bonferroni

Este método Ayuda a controlar el nivel de confianza simultáneo para todo un conjunto de intervalos de confianza, para el cual se debe considerar el nivel de confianza simultáneo en el momento de revisar los intervalos de confianza, dado que es mayor la probabilidad de que al menos uno de los intervalos no cumpla el parámetro de la población en un conjunto de intervalos que en un intervalo individual. Para disminuir esta tasa de error, la prueba de Bonferroni ajusta el nivel de confianza de cada intervalo individual, tal que el nivel de confianza simultáneo resultante sea el mismo valor que especifique (Manual Minitab 17).

Los intervalos de confianza más amplios de Bonferroni proveen estimaciones menos precisas del parámetro de población, pero limitan a un máximo de 5 % la probabilidad de que uno o más de los intervalos de confianza no contengan el parámetro.

El método de Bonferroni asegura que el nivel de confianza general sea de $1 - \alpha$ para la estimación de intervalos conjuntos. Existen programas estadísticos que implementan este método en sus análisis, uno de estos es el software Minitab 17.

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se describen las características de los componentes de las estaciones hidrociclónicas, los procesos necesario para la realización de las pruebas en el laboratorio y las pautas para la determinación de la eficiencia, la cual representa la mejor presión para la concentración de sólidos.

La sección 3.1 presenta los flujos de trabajo de la planta extractora en los subprocesos a partir del balance de masas. En la sección 3.2 se muestran las dimensiones y características de los hidrociclones disponibles en la rallandería, para elegir la configuración necesaria para la instalación y correcto funcionamiento de las estaciones hidrociclónicas, sin afectar la continuidad del proceso como se explica en la sección 3.3.

Con las estaciones hidrociclónicas ya instaladas se procede a tomar las muestras bajo las condiciones descritas en la sección 3.4, para realizar las pruebas en el laboratorio y determinar la eficiencia de interés para la empresa como se define en la sección 3.5.

La importancia del agua y el consumo de este recurso en la planta extractora de almidón se exponen en la sección 3.6.

El software utilizado para el procesamiento estadístico de los datos se describe en la sección 3.7. A partir del análisis de este procesamiento se determina, de manera estadística, el nivel de presión al cual se logra la mayor eficiencia.

3.1. Flujos de trabajo en la planta

Para definir la configuración y el número de hidrociclones es necesario conocer los flujos de la planta extractora, especialmente en el subproceso previo a la sedimentación. Por esta razón se debe estudiar el balance de masas mostrado en el anexo A1. Este expone la contabilización exacta de todos los materiales que entran, salen, se acumulan o se agotan en el trayecto de un intervalo de tiempo durante un proceso o un subproceso, es decir que el balance de masas es la expresión de la ley de conservación de la masa.

Se debe tener en cuenta que se hacen medidas directas de la masa y estructura de cada corriente que entra o sale en el proceso durante un intervalo de material en un tiempo dado, además de las medidas de variación en el intervalo de material dentro del sistema durante aquel intervalo de tiempo (Olaf et al., 1982).

El balance de masas estudiado para este proyecto, fue realizado por la empresa Deriyuca Ltda. con la colaboración del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

Como resultado del balance de masas se puede observar que al ingresar en el inicio de la operación 1000 kg de masa total, descompuestos en 649kg de agua, 266 kg de almidón y 85 kg de otros materiales (fibras, cascarilla, proteína, entre otros.), se obtiene después de la filtración plana una masa total de 4238 kg, que corresponde a 3976 kg de agua, 239 kg de almidón y 23 kg de otros materiales. Estos datos obtenidos involucran las entradas y salidas de masa de los subprocesos previos (ingreso de agua y salida de cascarilla, afrecho, entre otros). A partir de la anterior información se puede determinar que en el punto clave para la instalación de las estaciones hidrociclónicas es previo al proceso de sedimentación, logrando así reducciones en el tiempo y la longitud de canales necesarias para el subproceso de sedimentación. En el desarrollo del experimento es necesario tener presente que en el proceso de extracción previo a la sedimentación la lechada se conduce con un flujo continuo de 3.0 l/s aproximadamente, según información proporcionada por los colaboradores de Deriyuca Ltda.

3.2 Características de los hidrociclones empleados

Los hidrociclones disponibles para la instalación de las estaciones, han sido adquiridos previamente por la empresa Deriyuca Ltda. El diseño de estos fue realizado teniendo en cuenta los flujos de trabajo en la planta, el conocimiento de los colaboradores de la empresa y artículos investigativos (MOZLEY) con los parámetros de diseño en hidrociclones incorporados en procesos de extracción de almidón de yuca. Por consiguiente con las consultas realizadas por la empresa, se busca que el diseño y construcción de los hidrociclones logre una separación del flujo másico de almidón no menor al 70 % por el Underflow respecto a la alimentación en cada uno, buscando finalmente aumentar la concentración de almidón en la salida de Underflow.

3.2.1 Determinación de la configuración de los hidrociclones

En un hidrociclón con entrada y salidas de tamaño pequeño se presenta una mayor recuperación de sólidos pero esto a su vez esto repercute en una menor capacidad del mismo, por esto es recomendable que durante la operación del hidrociclón la salida inferior se pueda ajustar, de modo que la recuperación de sólidos puede variar dependiendo del grado de apertura (Rey, 2013). Aunque existen relaciones que pueden ayudar a determinar el diámetro con la mejor eficiencia, es importante realizar pruebas experimentalmente y verificar si las medidas se ajustan a lo esperado.

La cantidad de hidrociclones se determinó teniendo en cuenta que la capacidad máxima de flujo volumétrico de cada hidrociclón es de 0.8 l/s y en la alimentación de la primera estación ingresan aproximadamente 3.0 l/s, por esta razón no se puede utilizar un solo hidrociclón. La configuración de estos en serie no es posible, pues al implementarlos en la estación de esta manera se interrumpe la continuidad en el proceso, en vista de esto es necesario realizar una configuración en paralelo con

cuatro hidrociclones por estación para garantizar una capacidad de flujo volumétrico en la entrada de 3.2 l/s, dando un margen de variación máximo de 0.2 l/s por estación, esto debido principalmente al aumento o disminución del flujo volumétrico en la alimentación.

Las dimensiones de cada hidrociclón se muestran en la tabla 3.1. y la figura 3.1. además uno de los hidrociclones utilizado en la figura 3.2.

Tabla 3.1. Dimensiones de los hidrociclones utilizados.

Dimensiones	
D_c [cm]	2.55
D_a [cm]	0.48
D_v [cm]	0.83
D_f [cm]	1.74
$H1$ [cm]	31.03
$H2$ [cm]	3.66
L_v	9.57
α_c	88.09 °

Fuente: Propia.

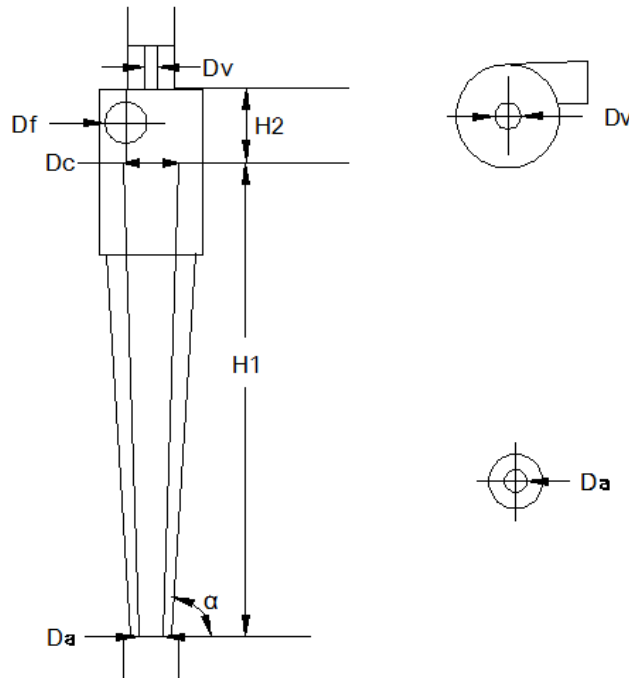


Figura 3.1. Representación de las dimensiones de los hidrociclones utilizados.

Fuente: Propia.



*Figura 3.2. Hidrociclón utilizado.
Fuente: Propia.*

3.3 Descripción de montajes de las estaciones

Una vez escogida la configuración y el número de hidrociclones a utilizar en las estaciones se procede a su instalación adecuando el sitio elegido, que en este caso corresponde a la parte izquierda superior de la zona de canales de sedimentación sobre el tanque colector de la lechada proveniente del subproceso de filtración plana, como muestra la figura 3.3.

Cada estación a implementar tiene los siguientes componentes y accesorios.

- Cuatro hidrociclones (diseñados y contruidos por Deriyuca Ltda.).
- Un manómetro con diafragma.
- 3.8 m de tubería PVC de 3/4 pulgada.
- 4.9 m de tubería PVC de 1 1/4 pulgada.
- 3.2 m de tubería PVC de 2 pulgadas.
- Cinco válvulas de bola de 1 1/4 de pulgadas.
- Nueve codos de 90° 3/4 x 3/4 pulgada.

- Ocho codos de 1 1/4 x 1 1/4 pulgadas.
- Un codo de 90° 2 x 2 pulgadas.
- Siete Tee de 1 1/4 x 1 1/4 x 1 1/4 S x S.
- Cuatro uniones universales PVC de 3/4 pulgada.

Adicionalmente se emplearon las siguientes uniones por estación.

- Nueve uniones de 3/4 pulgada (Primera estación).
- Una unión PVC de 1 1/4 pulgada (Primera estación).
- Diez uniones PVC de 3/4 pulgada (Segunda estación).
- Dos uniones PVC de 1 1/4 pulgada (Segunda estación).



Figura 3.3 Sitio escogido para la construcción de las estaciones hidrociclónicas.

Fuente: Propia.

Para garantizar el buen funcionamiento de las estaciones se cuenta con dos bombas que tienen una potencia de 5 HP (3728.5 W) y trabajan a 3600 RPM, las cuales están ubicadas en la alimentación de cada estación. Una bomba recibe la lechada del tanque colector para alimentar la primera estación hidrociclónica y la otra bomba alimenta la segunda estación con el flujo proveniente del Overflow de la primera estación, como se muestra en el anexo A2.

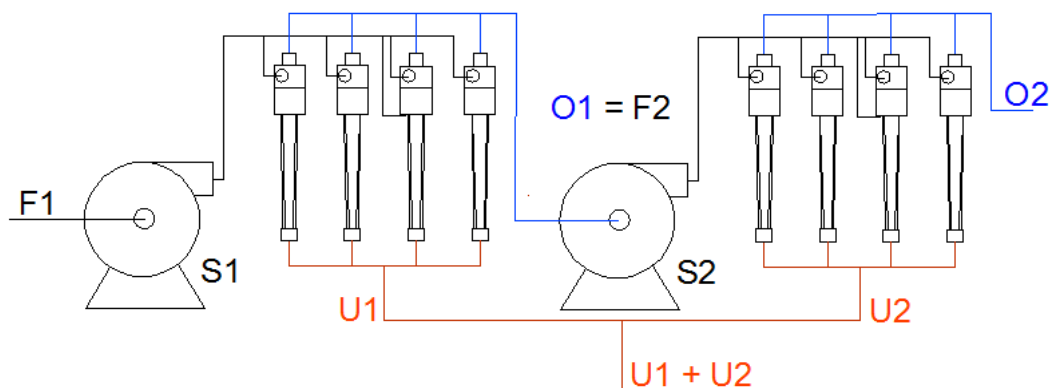


Figura 3.4. Diagrama de la configuración en las estaciones hidrociclónicas implementadas.
Fuente: Propia.

Es necesario asegurarse de tener una buena instalación eléctrica cerca al sitio escogido, para poner en funcionamiento las bombas y se debe contar con una alimentación trifásica.

Como se puede ver en la figura 3.4 las estaciones se conectan en serie y cada una con cuatro hidrociclones conectados en paralelo, la salida del Overflow de los hidrociclones de la primera estación, alimenta la segunda estación y los flujos del Underflow de ambas estaciones caen en el canal de sedimentación, mientras que el flujo del Overflow de la segunda estación, llega a los siete canales de sedimentación para estudiar las concentraciones del almidón y las posibilidades de reutilizar el agua residuo de este subproceso.

3.4. Toma de muestras y prueba de materia seca.

Una vez construidas las estaciones se evalúa su funcionamiento determinando los flujos máscicos de Overflow y Underflow además de identificar las particiones de agua, almidón y mancha; con estos datos se realizará el cálculo de la eficiencia de las mismas.

Muestras en campo

Para la toma de muestras en campo es necesario tener control de todo el funcionamiento de los equipos de la planta asegurando que trabajen de forma continua. Además, la yuca utilizada para la prueba debe ser de la misma variedad, del mismo proveedor y estar en buenas condiciones (yuca fresca).

En el experimento se varía la presión de la bomba de cada estación a 50, 70 y 75 psi, siempre generando presiones iguales en las dos bombas. En este punto es importante tener en cuenta que para cada cambio de nivel de presión se debe dejar estabilizar el proceso por un periodo de 20 minutos.

Se toman tres réplicas por cada cambio de presión según el diseño estadístico mencionado en la sección 2.4.

Las muestras se toman en cada salida del hidrociclón (Overflow y Underflow) de manera simultánea con la ayuda de dos recipientes de 4 litros. El recipiente que se emplea en el Overflow debe estar marcado a un nivel deseado, el cual indicará el punto donde debe detenerse la toma de muestras de Overflow y Underflow, una vez la lechada supere dicha marca en el recipiente.

Se debe contar con un cronometro que será activado en el momento que los experimentadores empiecen a tomar la muestra y se detendrá una vez la lechada llegue al nivel marcado para el recipiente del Overflow. Hay que tener en cuenta que los experimentadores deben tener un tiempo de reacción muy similar para que detengan la toma de muestra simultáneamente y la muestra sea confiable. Este procedimiento se repetirá en la estación dos a la misma presión; para este caso en particular, al ser un experimento en campo y tener un difícil acceso, las muestras fueron tomadas de las salidas de solo un hidrociclón de cada estación, asumiendo que la geometría de los ocho hidrociclones es igual, la presión es constante y las condiciones de los equipos están controladas y por lo tanto la dinámica de cada hidrociclón es igual a la de los demás dentro de la misma estación. Al tener dos estaciones, y tomar tres muestras en las cada una de las dos salidas de uno de los hidrociclones de cada estación por cada nivel de presión (tres niveles) que se modifica, se obtiene un total de 36 muestras que deben ser almacenadas en botellas plásticas de 3 litros. Antes de iniciar el experimento, estas botellas deben estar vacías, completamente secas, pesadas y rotuladas con la estación, la presión, la salida del hidrociclón a la que corresponde la muestra y la masa que tiene la botella. Después de pasar la muestra a cada botella previamente rotulada, se toma la masa neta de la botella con la muestra de lechada. La masa de las botellas vacías [g] utilizadas para almacenar las muestras obtenidas del Overflow y Underflow son consignados en una tabla teniendo en cuenta el tiempo transcurrido en la toma de la muestra para i-ésima replica en determinado nivel. De la misma manera se registran la masa de las botellas con la lechada [g].

Después de almacenar y tratar las muestras se deben transportar al laboratorio en el que serán analizadas. Este transporte debe ser muy cuidadoso, se debe procurar que las botellas estén selladas para que no se pierda el material y que el movimiento sea mínimo de tal forma que no se altere la muestra.

Prueba de Materia Seca en Laboratorio

Estando en el laboratorio se deben poner a sedimentar las muestras por 72 horas en un lugar plano, donde no sufran ningún movimiento y no tengan riesgo de caer. Pasado este periodo de sedimentación, se debe observar que la muestra se separa en almidón al fondo del recipiente, mancha por encima del contenido de almidón y agua en la parte superior de la botella, como se muestra en la figura 3.5.



*Figura 3.5. Sedimentación de muestras de lechada a 72 horas.
Fuente: Propia.*

Teniendo las particiones de la lechada ya separadas por sedimentación en la botella, se extrae el agua de la muestra y cuidadosamente, sin ir a perder material, se separa la mancha y el almidón en recipientes de aluminio que deben estar previamente pesados y rotulados con la estación y presión a la cual pertenece dicha muestra, además del material (almidón o mancha), masa del recipiente y salida (Overflow o Underflow) a la que corresponde.

Después de haber separado las muestras se extrae la materia seca en laboratorio, en este caso el laboratorio de Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle, donde se introducen las muestras en un horno precalentado a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas. Transcurrido este tiempo, las muestras se extraen y se dejan reposar por aproximadamente 15 minutos para ser pesadas, como se muestra en el anexo A3. Los datos obtenidos de este proceso en laboratorio se registran en una tabla por estación, donde para los datos de la masa del almidón [g] en el Overflow y Underflow se tiene en cuenta el tiempo transcurrido en la toma de la muestra para la i -ésima réplica en determinado nivel, además de la masa de la mancha [g].

3.5 Eficiencia de la Configuración de Hidrociclones

Una eficiencia del 100 % indica que todas las partículas sólidas gruesas son colectadas en la corriente del hidrociclón y expulsadas en su totalidad por el Underflow, vale la pena señalar que una eficiencia del 100 % no es posible de lograr, pues siempre una parte del material por mínima que sea es expulsado por el Overflow.

Eficiencia de Separación de Sólidos

Esta eficiencia de sólidos obtenidos en el Underflow de ambas estaciones se calcula respecto al total de sólidos que ingresan en la alimentación. Basado en el cálculo de la eficiencia de los hidrociclones en (Reina, 2011) se construye la ecuación de eficiencia para la configuración de hidrociclones implementada como se muestra en la ecuación 3.1.

$$\dot{M}_{Almidón\ T} = \dot{M}_{Almidón\ U1} + \dot{M}_{Almidón\ O1}$$

$$E = \frac{\dot{M}_{Almidón\ U1} + \dot{M}_{Almidón\ U2}}{\dot{M}_{Almidón\ T}} * 100 \% \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde $\dot{M}_{Almidón\ Ui}$ es el flujo másico de almidón en el Underflow de la i-ésima estación, $\dot{M}_{Almidón\ Oi}$ es el flujo másico de almidón en el Overflow de la i-ésima estación, $\dot{M}_{Almidón\ T}$ es el flujo másico de almidón en la entrada de la primera estación. Estos flujos están dados en kg/s.

Eficiencia Relativa al Flujo de Entrada

La eficiencia relativa al flujo de entrada permite conocer la separación de sólidos en la unión del Underflow de ambas estaciones respecto al flujo de alimentación total. Esta es la variable de interés en el estudio por solicitud de la empresa, debido a que tiene en cuenta el porcentaje desconocido de sólidos y agua en la alimentación, representando finalmente la eficacia de los hidrociclones separando el almidón y concentrándolo en el Underflow de ambas estaciones respecto al flujo másico de alimentación del sistema.

$$E_r = \left((C_{\%AlmidónU1} * \dot{M}_{\%U1}) + (C_{\%AlmidónU2} * \dot{M}_{\%U2} * \dot{M}_{\%O1}) \right) * 100\% \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde $C_{\%AlmidónUi}$ corresponde a la concentración de almidón en el Underflow de la i-ésima estación, $\dot{M}_{\%Ui}$ es el flujo másico total en el Underflow de la i-ésima estación, y $\dot{M}_{\%O1}$ es el flujo másico total del Overflow de la primera estación. Para el cálculo de E_r es necesario que las variables independientes de la ecuación sean expresadas en valor porcentual en el intervalo [0, 1]. El resultado de E_r se obtendrá en un valor de entre 0 y 100 %.

3.6 Importancia de la reutilización del agua para el consumo en la rallandería

En las plantas extractoras de almidón de yuca operadas tradicionalmente, el consumo de agua es muy elevado lo cual trae un serio impacto para el recurso hídrico. En el caso de Deriyuca Ltda. se

consumen por cada 1000 kg de yuca fresca, 5454 kg de agua tomados de la fuente de agua disponible, de los cuales 1665 kg de agua entran en el proceso de lavado, 521 kg de agua en el rallado, 136 kg de agua en la suspensión de pulpa, 3033 kg de agua en el proceso de centrifugado y 99 kg de agua en la filtración plana, al final del proceso de sedimentación se estima que existe un total de 3777 kg de agua residual esto se muestra en el anexo A1 ; al consumir y desechar una gran cantidad de agua, se dificulta el control del vertimiento del agua en la salida del proceso generando consecuencias perjudiciales principalmente en las cuencas hidrográficas.

Teniendo en cuenta que la salida del agua residuo del proceso es aquella del Overflow proveniente de la segunda estación hidrociclónica, para determinar el porcentaje del flujo másico de residuo respecto al flujo de entrada del proceso será suficiente determinar el flujo másico de dicha salida Overflow.

Es necesario conocer las condiciones del caudal perteneciente al Overflow de la segunda estación, para determinar en qué parte del sistema es posible reincorporar el agua residuo. En vista de que la centrifugación es una parte del proceso a la cual se le debe suministrar una gran cantidad de agua, sería conveniente por esta razón recircular el agua hacia la segunda centrífuga, pero para esto es necesario que la concentración de sólidos en el agua residuo sea inferior al 10 %. Será entonces necesario conocer el flujo másico de entrada a la segunda estación (que corresponde al flujo másico del Overflow de la primera estación) y las concentraciones de almidón, mancha y agua en el Overflow de la segunda estación, para poder calcular la cantidad de agua relativa al flujo de entrada del proceso, que estará disponible para recirculación.

3.7 Software utilizado para el DCA

Para la realización del *DCA* se utiliza el software estadístico Minitab 17. El programa Minitab 17 es un software estadístico versátil y de fácil uso, que proporciona un amplio rango de aplicaciones estadísticas y facilita la realización de los gráficos.

Algunas ventajas del software son el diseño especial para la realización de cálculos estadísticos. Su uso es sumamente sencillo y fácilmente asimilable por el usuario al encontrarse en una interfaz habitual, debido a que se trata de un programa que funciona a base de cuadro de diálogos y ventanas.

Es necesario resaltar que tiene una gama completa de procedimientos estadísticos utilizados en la estimación de parámetros y pruebas de hipótesis para una o más muestras. Estos procedimientos conforman la base para una investigación más avanzada. Entre ellos, están las estadísticas y las gráficas descriptivas, variables aleatorias y modelos probabilísticos, muestreo y distribuciones muestrales, las pruebas de hipótesis y los intervalos de confianza, la varianza y el análisis de correlación, entre otros.

Las herramientas que se utilizan en el software para el *DCA* son las siguientes:

ANOVA de un Solo Factor

El análisis de varianza (ANOVA) es uno de los métodos más usados en la toma de decisiones basadas en el análisis estadístico. Este prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales como se muestra en la sección 2.4.

En este diseño se evalúa la mejor presión para la concentración de almidón, por ende se examina un factor (Presión), por esta razón se utiliza un ANOVA de un solo factor. Si el valor p es menor que el nivel de significancia, entonces se concluye que al menos una media de presión es diferente.

Modelo Lineal General

Se realiza un análisis con el modelo estadístico de un *DCA* de un solo factor mostrado en la sección 2.4 partiendo del supuesto de que las varianzas son iguales, para determinar si las medias de dos o más grupos difieren cuando se incluyen factores aleatorios, covariables o una combinación de factores cruzados y anidados.

Prueba de Igualdad de Varianzas

Al haber asumido la igualdad en las varianzas para el modelo lineal del ANOVA, se debe realizar la prueba para comprobar la igualdad de las varianzas entre poblaciones o niveles de factores. Muchos procedimientos estadísticos, como el análisis de varianza (ANOVA) y la regresión, parten del supuesto de que aunque las diferentes muestras pueden provenir de poblaciones con medias diferentes, tienen la misma varianza.

Las inferencias del análisis ANOVA solo se ven afectadas ligeramente por la desigualdad de la varianza si el modelo solo contiene factores fijos y tiene tamaños de muestra iguales o casi iguales. Por otro lado, los modelos de ANOVA con efectos aleatorios y/o tamaños de muestra desiguales pueden verse afectados sustancialmente. En el caso de que el valor p resultante es mayor que las opciones adecuadas del nivel de significancia, no se debe rechazar la hipótesis nula de que las varianzas son iguales, esto asegura que se cumple el supuesto de igualdad de varianzas, las hipótesis para la prueba son que todas las varianzas son iguales (H_0) o que no todas las varianzas son iguales (H_1).

De manera predeterminada, Minitab muestra los resultados del método de Levene y del método de comparaciones múltiples. Para la mayoría de las distribuciones continuas, ambos métodos proporcionan una tasa de error de tipo I que está cerca del nivel de significancia especificado (también conocido como alfa o α), generalmente el método de comparaciones múltiples es más potente, pero en el experimento nuestras muestras tienen menos de 20 observaciones para la prueba de varianzas iguales, por esta razón es conveniente usar la prueba F o la prueba de Barlett.

Al usar la prueba F o la prueba de Barlett se opta por mostrar los resultados de la prueba basada en la distribución normal. Si solo se tiene dos grupos o niveles de factores, entonces Minitab realiza la prueba F y cuando se tienen tres o más grupos o niveles de factores, entonces Minitab realiza la prueba de Bartlett para la comparación de las varianzas iguales. Estas pruebas son exactas solo para datos distribuidos normalmente, además cualquier desviación de la normalidad puede hacer que estas pruebas produzcan resultados inexactos. Sin embargo, si los datos se ajustan a la distribución normal, entonces la prueba F y la prueba de Bartlett normalmente son más potentes que el método de comparaciones múltiples o el método de Levene para la prueba de igualdad de varianzas.

Prueba de Comparaciones Múltiples

Posteriormente es necesario realizar la prueba de comparaciones múltiples, la cual permite evaluar la significancia estadística de las diferencias entre las medias utilizando un conjunto de intervalos de confianza, un conjunto de pruebas de hipótesis o ambos. Como siempre, se rechaza la hipótesis nula de que no existe diferencia alguna entre las medias, si y solo si el intervalo de confianza no contiene cero.

Las tasas de error individuales son exactas en todos los casos y las que son por familia son exactas para grupos de un mismo tamaño. Si los tamaños de los grupos no son iguales, la verdadera tasa de error por familia para Tukey y MCB será levemente más pequeña que la especificada, lo que produciría intervalos de confianza conservadores. Las tasas de error por familia de Dunnett son exactas para tamaños de grupos diferentes.

La selección del método de comparación múltiple apropiado depende de la inferencia que se desee. Las características y ventajas de algunos métodos de comparación múltiple presentes en Minitab 17 se resumen en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Características y ventajas de los métodos de comparación múltiple presentes en Minitab.

Método	Datos normales	Resistencia	Comparación con un control	Comparación en parejas
Tukey	Sí	Prueba más potente cuando se realizan comparaciones en parejas.	No	Sí
Dunnett	Sí	Prueba más potente cuando se compara con un control.	Sí	No
Desigualdad de Bonferroni	-	Procedimiento robusto, pero produce intervalos de confianza grandes. Por lo general, conservadores.	Sí	Sí
Método de MCB de Hsu	Sí	La prueba más potente cuando se compara el grupo que tiene la media más alta o más baja con los demás grupos.	No	Sí

Teniendo en cuenta la información de la tabla 3.2 para realizar la comparación múltiple se usará el método de Bonferroni, en vista de que este método controla el nivel de confianza simultáneo para un conjunto completo de intervalos de confianza como se explica en la sección 2.4.

Los intervalos son construidos con un nivel de confianza de $(1 - \alpha/n_i)$, siendo n_i el número de intervalos. Para los intervalos de Bonferroni, este software utiliza intervalos de confianza de 99% ($1 - 0.05/5 = 0.99$) para obtener un nivel de confianza simultáneo de 95 % (Manual Minitab 17).

Potencia y tamaño de la muestra

Para conocer el número de réplicas adecuado se debe conocer la potencia pues esta medida expone la capacidad de una prueba para detectar de manera exacta que la hipótesis nula es falsa. Específicamente, la potencia es la probabilidad de que una prueba con los supuestos especificados (tamaño de la muestra, diferencia, desviación estándar, nivel alfa y tipo de hipótesis alternativa) rechace correctamente la hipótesis nula cuando la hipótesis alterna sea verdadera.

Ninguna prueba es perfecta; siempre existe la posibilidad de que los resultados de una prueba lleven a rechazar la hipótesis nula (H_0) cuando en realidad sea verdadera (un error de tipo I) o no poder rechazar H_0 cuando en realidad sea falsa (un error de tipo II). Esto se debe a que para estimar las medias de la población, se tienen que tomar muestras aleatorias, y las muestras aleatorias no son más que eso, aleatorias. Por lo tanto, siempre es posible que la media de su muestra sea muy diferente de la media de la población.

Para aumentar la potencia de un ANOVA de un solo factor se puede utilizar cualquiera de los siguientes métodos:

Utilizar una muestra más grande para proporcionar más información sobre la población y, por ende, sobre aumentar la potencia. El uso de una muestra más grande es con frecuencia la manera más práctica de aumentar la potencia.

Elegir un valor más grande para Valores de la diferencia máxima entre las medias, debido a que es más fácil detectar diferencias más grandes en las medias de las poblaciones.

Mejorar su proceso buscando disminuir la desviación estándar y, por ende, aumentar la potencia.

Utilizar un nivel de significancia mayor (también llamado alfa o α), aumentará la probabilidad de que rechace la hipótesis nula. Sin embargo, debe tener cuidado, porque usted no desea rechazar una hipótesis nula que sea en realidad verdadera. (Rechazar una hipótesis nula que sea verdadera se conoce como error de tipo I).

Capítulo 4

Presentación y Análisis de Resultados

En este capítulo se muestran los datos obtenidos tras el proceso de secado de las unidades experimentales de lechada, además de los resultados calculados a partir de estos, tales como concentraciones, flujos máscicos y flujos volumétricos.

En la Sección 4.1 se presentan los datos tomados al inicio del experimento y los resultados de la masa y concentración de almidón, mancha y agua, para cada replica en cada nivel, obtenidos a partir de la realización de la prueba de materia seca, además de las concentraciones de almidón a diferentes presiones en la alimentación de las dos estaciones y en la salida del Overflow en la segunda estación.

El análisis estadístico de los resultados obtenidos de concentración total de almidón en las salidas Underflow de los hidrociclones se expone en la Sección 4.2, que fue realizado con la ayuda de las herramientas del software Minitab. Esta sección detalla paso a paso el análisis de varianza, las pruebas de confirmación de supuestos y las pruebas de comparación múltiple que permiten encontrar el nivel de presión que presenta una mejor eficiencia. El cálculo del flujo de agua que es posible recircular desde el Overflow de la segunda estación se muestra en la Sección 4.3.

4.1. Datos obtenidos

Con los datos requeridos previamente en el análisis de laboratorio sección 3.4, se genera la tabla 4.1 y donde se registra la masa de la lechada, el tiempo de llenado y la masa de la botella de cada muestra para las salidas de cada estación. Las réplicas se realizaron en un solo hidrociclón, pues dado que las características son idénticas en el diseño de los hidrociclones, se asume que el comportamiento de estos es exactamente igual en cada estación.

Tabla 4.1. Masa de la botella y masa de la botella más lechada en la primera estación.

Factor	Nivel	Réplica	Tiempo [s]	Masa Botella [g]		Masa Botella + Lechada [g]	
				Overflow S1	Underflow S1	Overflow S1	Underflow S1
Presión	50 psi	1	5.00	53.04	56.11	2015	901
		2	5.38	56.10	56.11	2106	984
		3	5.12	55.89	55.73	2114	920
	70 psi	1	7.28	56.22	55.84	2521	1179
		2	6.56	55.83	55.84	2656	1070
		3	6.62	56.14	55.59	2734	925
	75 psi	1	4.12	63.01	55.94	1893	847
		2	4.14	61.28	56.98	2077	885
		3	4.86	63.42	55.90	2059	1008

Tabla 4.2. Masa de la botella y masa de la botella más lechada en la segunda estación.

Factor	Nivel	Réplica	Tiempo [s]	Masa Botella [g]		Masa Botella + Lechada [g]	
				Overflow S2	Underflow S2	Overflow S2	Underflow S2
Presión	50 psi	1	11.71	55.87	55.92	1982	1038
		2	12.10	56.28	55.70	2089	1066
		3	12.51	63.46	62.61	1941	1057
	70 psi	1	8.99	55.76	55.71	2490	1284
		2	6.29	55.90	55.67	2591	918
		3	9.48	56.12	55.75	2814	1229
	75 psi	1	6.29	58.98	62.92	1887	763
		2	6.95	55.81	62.28	2093	888
		3	6.24	55.84	55.97	2140	914

A partir de los datos obtenidos en la tabla 4.1 y 4.2, y tras realizar la prueba de materia seca se obtiene la masa de almidón, mancha y agua por cada replica en cada nivel, estos datos se registran en las tablas 4.3 y 4.4

Tabla 4.3. Masa del almidón, mancha y agua en la primera estación.

Factor	Nivel	Réplica	Tiempo [s]	Masa Almidón [g]		Masa Mancha [g]		Masa Agua [g]	
				Overflow	Underflow	Overflow	Underflow	Overflow	Underflow
				S1	S1	S1	S1	S1	S1
Presión	50 psi	1	5.00	341.24	354.32	22.76	9.08	7483.84	3016.16
		2	5.38	393.08	450.40	28.32	12.24	7778.20	3248.92
		3	5.12	303.00	327.16	12.56	8.72	7916.88	3121.20
	70 psi	1	7.28	236.16	306.12	22.24	5.72	9600.72	4180.80
		2	6.56	282.88	278.52	24.92	12.24	10092.88	3765.88
		3	6.62	370.64	276.64	17.32	8.00	10323.48	3193.00
	75 psi	1	4.12	242.04	289.60	21.80	14.12	7056.12	2860.52
		2	4.14	356.72	311.84	20.68	9.76	7685.48	2990.48
		3	4.86	272.20	364.76	18.44	8.68	7691.68	3434.96

Tabla 4.4. Masa del almidón, mancha y agua en la primera estación.

Factor	Nivel	Réplica	Tiempo [s]	Masa Almidón [g]		Masa Mancha [g]		Masa Agua [g]	
				Overflow	Underflow	Overflow	Underflow	Overflow	Underflow
				S2	S2	S2	S2	S2	S2
Presión	50 psi	1	11.71	233.56	177.96	18.16	11.56	7452.80	3738.80
		2	12.10	340.88	189.64	20.04	16.6	7769.96	3834.96
		3	12.51	295.36	185.96	17.96	7.52	7196.84	3784.08
	70 psi	1	8.99	212.28	285.04	26.52	8.36	9498.16	4619.76
		2	6.29	256.84	233.96	16.64	11.32	9866.92	3204.04
		3	9.48	297.00	253.00	27.44	6.44	10707.08	4433.56
	75 psi	1	6.29	260.80	146.8	15.16	6.72	7036.12	2646.80
		2	6.95	310.44	173.28	24.48	11.28	7813.84	3118.32
		3	6.24	278.68	181.56	21.44	10.84	8036.52	3239.72

Una vez se conocen las masas que componen el flujo másico de ingreso por estación, se calculan las concentraciones de almidón, agua y mancha como se observa en la Tabla 4.5 y 4.6.

Tabla 4.5. Concentraciones de almidón, mancha y agua por cada réplica en la primera estación hidrociclónica.

Factor	Nivel	Réplica	Concentración de Almidón [%]		Concentración de Mancha [%]		Concentración de Agua [%]	
			Overflow	Underflow	Overflow	Underflow	Overflow	Underflow
			S1	S1	S1	S1	S1	S1
Presión	50 psi	1	4.35	10.48	0.29	0.27	95.36	89.25
		2	4.79	12.14	0.35	0.33	94.86	87.54
		3	3.68	9.46	0.15	0.25	96.17	90.28
	70 psi	1	2.40	6.81	0.23	0.13	97.38	93.06
		2	2.72	6.87	0.24	0.30	97.04	92.83
		3	3.46	7.95	0.16	0.23	96.38	91.82
	75 psi	1	3.31	9.15	0.30	0.45	96.40	90.40
		2	4.42	9.42	0.26	0.29	95.32	90.29
		3	3.41	9.58	0.23	0.23	96.36	90.19

Tabla 4.6. Concentraciones de almidón, mancha y agua por cada réplica en la segunda estación hidrociclónica.

Factor	Nivel	Réplica	Concentración de Almidón [%]		Concentración de Mancha [%]		Concentración de Agua [%]	
			Overflow	Underflow	Overflow	Underflow	Overflow	Underflow
			S2	S2	S2	S2	S2	S2
Presión	50 psi	1	3.03	4.53	0.24	0.29	96.73	95.18
		2	4.19	4.69	0.25	0.41	95.56	94.90
		3	3.93	4.68	0.24	0.19	95.83	95.14
	70 psi	1	2.18	5.80	0.27	0.17	97.55	94.03
		2	2.53	6.78	0.16	0.33	97.30	92.89
		3	2.69	5.39	0.25	0.14	97.06	94.47
	75 psi	1	3.57	5.24	0.21	0.24	96.23	94.52
		2	3.81	5.25	0.30	0.34	95.89	94.41
		3	3.34	5.29	0.26	0.32	96.40	94.39

También utilizando los datos de las tablas 4.3 y 4.4 se obtiene la tabla 4.7 y la tabla 4.8 donde se registran las concentraciones de sólidos a diferentes presiones en la alimentación del conjunto de estaciones y en la salida del Overflow en la segunda estación.

Tabla 4.7. Concentración de sólidos en la alimentación del conjunto de estaciones.

Nivel	Réplica	Concentración de Sólidos en la Alimentación [%]
50 psi	1	4.8428
	2	5.7052
	3	4.7956
70 psi	1	3.5846
	2	3.7516
	3	4.0025
75 psi	1	4.5602
	2	5.0480
	3	4.6571

Tabla 4.8. Concentración de sólidos en el Overflow de la segunda estación.

Nivel	Réplica	Concentración de Sólidos en la Salida del segundo Overflow [%]
50 psi	1	3.2672
	2	4.4389
	3	4.1719
70 psi	1	2.4525
	2	2.6969
	3	2.9410
75 psi	1	3.7740
	2	4.1101
	3	3.6000

Después de conocer las concentraciones se realiza el cálculo del flujo másico. Para el caso del flujo volumétrico es necesario conocer la densidad de la lechada, esta densidad ha sido establecida con anterioridad a partir de los datos obtenidos en trabajos previamente realizados en la planta extractora de Deriyuca Ltda. en (Reina, 2011), se establece una densidad de lechada promedio de 0.8466 kg/l. Esta información se consigna en las tablas 4.9 y 4.10. Vale la pena aclarar que los flujos másicos y volumétricos registrados en las tablas representan el flujo relativo respecto al flujo de ingreso por cada estación, en otras palabras finalmente se toma la suma de los flujos de salida, asumiendo que el sistema no presenta pérdidas, como se muestra en el anexo A1.

Tabla 4.9. Flujo másico y flujo volumétrico en la primera estación hidrociclónica.

Factor	Nivel	Réplica	Flujo Másico				Flujo Volumétrico			
			Overflow S1		Underflow S1		Overflow S1		Underflow S1	
			[kg / s]	[%]	[kg / s]	[%]	[l / s]	[%]	[l / s]	[%]
Presión	50 psi	1	1.57	69.90	0.68	30.10	1.85	69.90	0.80	30.10
		2	1.52	68.84	0.69	31.16	1.80	68.84	0.81	31.16
		3	1.61	70.43	0.68	29.57	1.90	70.43	0.80	29.57
	70 psi	1	1.35	68.70	0.62	31.30	1.60	68.70	0.73	31.30
		2	1.59	71.94	0.62	28.06	1.87	71.94	0.73	28.06
		3	1.62	75.49	0.53	24.51	1.91	75.49	0.62	24.51
	75 psi	1	1.78	69.82	0.77	30.18	2.10	69.82	0.91	30.18
		2	1.95	70.88	0.80	29.12	2.30	70.88	0.94	29.12
		3	1.64	67.70	0.78	32.30	1.94	67.70	0.93	32.30

Tabla 4.10. Flujo másico y flujo volumétrico en la segunda estación hidrociclónica.

Factor	Nivel	Réplica	Flujo Másico				Flujo Volumétrico			
			Overflow S2		Underflow S2		Overflow S2		Underflow S2	
			[kg / s]	[%]	[kg / s]	[%]	[l / s]	[%]	[l / s]	[%]
Presión	50 psi	1	0.66	66.23	0.34	33.77	0.78	66.23	0.40	33.77
		2	0.67	66.80	0.33	33.20	0.79	66.80	0.39	33.20
		3	0.60	65.38	0.32	34.62	0.71	65.38	0.38	34.62
	70 psi	1	1.08	66.46	0.55	33.54	1.28	66.46	0.65	33.54
		2	1.61	74.62	0.55	25.38	1.90	74.62	0.65	25.38
		3	1.16	70.15	0.50	29.85	1.37	70.15	0.58	29.85
	75 psi	1	1.16	72.31	0.45	27.69	1.37	72.31	0.53	27.69
		2	1.17	71.16	0.48	28.84	1.38	71.16	0.56	28.84
		3	1.34	70.84	0.55	29.16	1.58	70.84	0.65	29.16

Con la información obtenida en las tablas 4.9 y 4.10, es posible conocer la eficiencia y realizar el cálculo de la cantidad de agua a recircular en el proceso como se muestra en la tabla 4.11.

Tabla 4.11. Flujo de agua en el Overflow de la segunda estación.

Nivel	Réplica	Flujo de Agua en la Salida Overflow 2 [l / s]
50 psi	1	0.7518
	2	0.7585
	3	0.6795
70 psi	1	1.2480
	2	1.8529
	3	1.3341
75 psi	1	1.3213
	2	1.3280
	3	1.5213

A partir de la ecuación de eficiencia relativa que se explica en la sección 3.5, se genera la tabla 4.12 donde se consignan los datos por réplica para cada nivel en las salidas Underflow.

Tabla 4.12. Eficiencia relativa de la configuración de las estaciones hidrociclónicas implementadas.

Factor	Nivel	Réplica	Eficiencia relativa de las estaciones hidrociclónicas [%]
Presión	50 psi	1	4.2252
		2	4.8538
		3	3.9388
	70 psi	1	3.4696
		2	3.1650
		3	3.1643
	75 psi	1	3.7758
		2	3.8140
		3	4.1380

4.2 Análisis Estadístico de los Resultados de la Eficiencia Relativa de la Configuración de las Estaciones Hidrociclónicas Implementadas.

El análisis estadístico de la variable de respuesta del experimento diseñado, que en este caso es la eficiencia relativa de la configuración de las estaciones hidrociclónicas implementada, es desarrollado utilizando el software estadístico Minitab 17 como se explicó en la Sección 3.7.

La estructura de datos para el análisis de varianza o ANOVA de un solo factor, relacionado al experimento, se muestra en la tabla 4.13.

Tabla 4.13. Estructura de los datos para el ANOVA del experimento.

<i>Tratamientos (Presiones)</i>				
<i>Replicas</i>	<i>50 psi</i>	<i>70 psi</i>	<i>75 psi</i>	
<i>1</i>	<i>4.23</i>	<i>3.47</i>	<i>3.78</i>	
<i>2</i>	<i>4.85</i>	<i>3.17</i>	<i>3.81</i>	
<i>3</i>	<i>3.94</i>	<i>3.16</i>	<i>4.14</i>	
<i>Total</i>	<i>13.02</i>	<i>9.80</i>	<i>11.73</i>	<i>34.54</i>
<i>Observ.</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>9</i>
<i>Medias</i>	<i>4.34</i>	<i>3.27</i>	<i>3.91</i>	<i>3.84</i>

Inicialmente se realizó la verificación de aleatorización adecuada de las muestras y el cumplimiento del modelo lineal general utilizado. A continuación se muestran las gráficas de probabilidad normal de residuos según cada nivel de los tratamientos utilizados en el experimento.

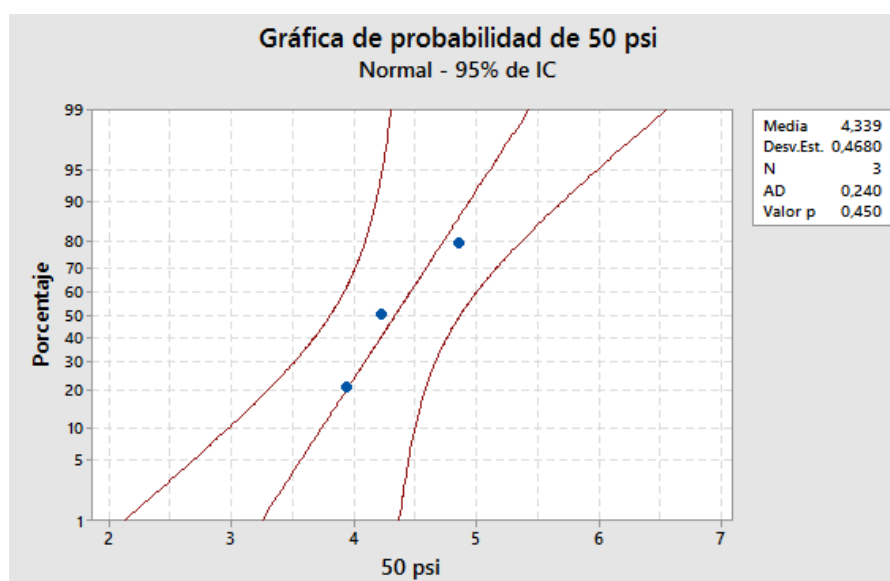


Figura 4.1. Gráfica de probabilidad normal de los residuos para respuesta ante presión de entrada a 50 psi.

La figura 4.1 muestra que para el nivel en presión de entrada de 50 psi, los datos de respuesta están normalmente distribuidos ya que el modelo corresponde a una línea recta, además de permitir observar una aleatorización adecuada y la no presencia de datos atípicos en las muestras.

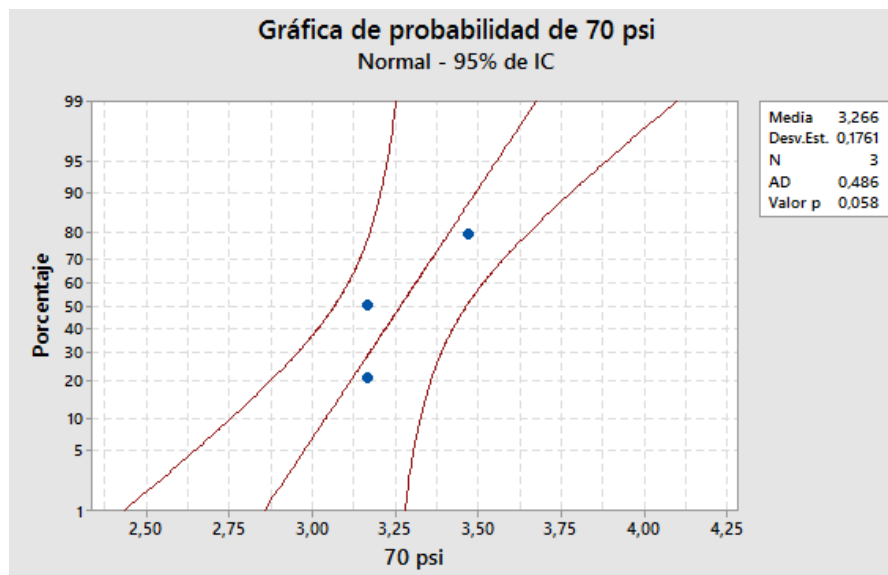


Figura 4.2. Gráfica de probabilidad normal de los residuos para respuesta ante presión de entrada a 70 psi.

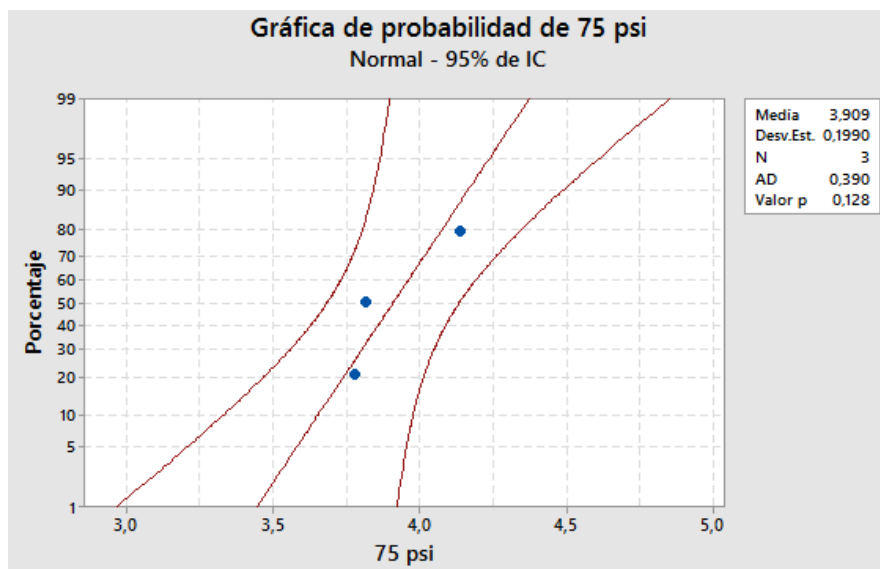


Figura 4.3. Gráfica de probabilidad normal de los residuos para respuesta ante presión de entrada a 70 psi.

Para el caso de los niveles de presión de entrada de 70 psi y 75 psi como se muestra en las figuras 4.2 y 4.3 respectivamente, es posible comprobar que los datos de respuesta se encuentran normalmente distribuidos, y aunque hay una aleatorización adecuada presentan un dato que sin llegar a considerarse atípico, se aleja de la línea que representa el modelo.

Posterior al análisis de las gráficas de probabilidad normal de los residuos, se procedió a generar la gráfica de intervalos de los grupos de datos de respuesta. La gráfica de intervalos permite visualizar

la tendencia central y la variabilidad de los datos presentes en las muestras de cada tratamiento. El punto central de cada intervalo indica la media de los datos, mientras que las barras verticales cuyo origen es dicha media, representan los intervalos de confianza de 95%.

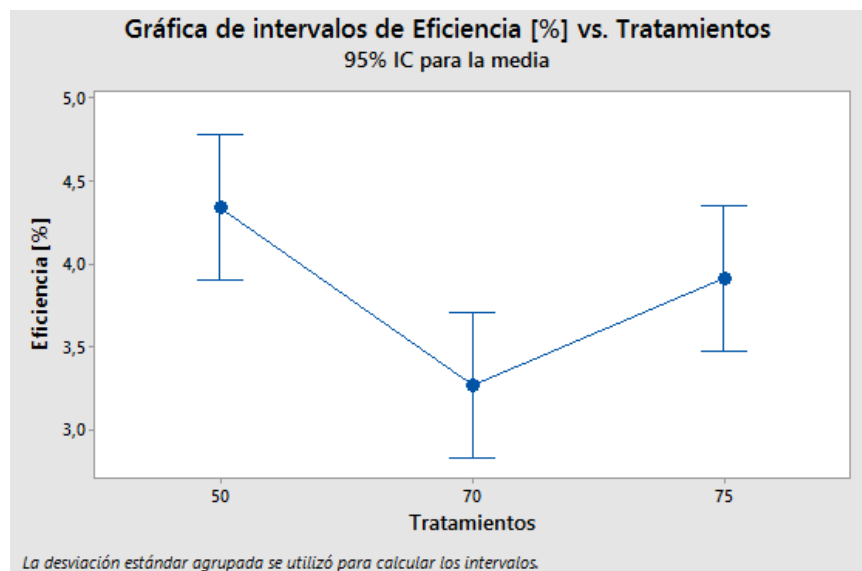


Figura 4.4. Gráfica de intervalos de los datos de respuesta del experimento.

La gráfica de intervalos permite realizar un primer análisis sobre las posibilidades existentes de diferencias significativas entre resultados de cada tratamiento. Así, es posible construir la hipótesis de que existen diferencias significativas entre tratamientos cuando las barras de intervalos no se superponen al proyectarse sobre el eje vertical, tal y como sucede con los tratamientos de 50 y 70 psi en la figura 4.4.

Tras comprobar la distribución normal y la adecuada aleatorización de los datos de respuesta del experimento, es necesario comprobar que el número de repeticiones utilizado en el diseño del experimento haya sido adecuado. Para ello, se utiliza la función de *Potencia y tamaño de la muestra para ANOVA de un solo factor* en Minitab 17.

Teniendo en cuenta que la diferencia mínima significativa establecida por los expertos es de 0.05 % y que la varianza estimada para el porcentaje de concentración total en el Underflow es de $\hat{\sigma}^2 = 0.1701372$ (Santiago y Díaz, 2016), se toma una potencia de prueba mínima de 0.95 y una diferencia máxima significativa de 2 % para definir el mínimo tamaño de muestra. La escogencia de la diferencia máxima significativa se debe a que se conoce previamente que los valores medios de los datos de cada tratamiento se diferencian en máximo 1.1 % aproximadamente.

El resultado de la prueba se muestra en la figura 4.5.

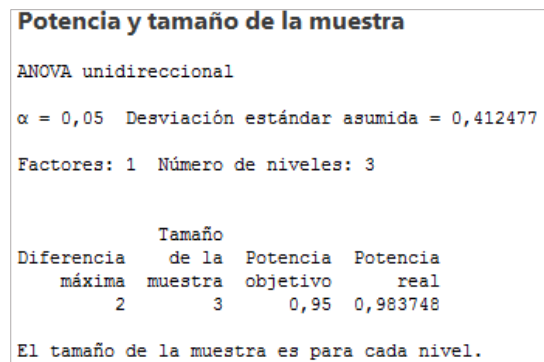


Figura 4.5. Resultado de la prueba de potencia y tamaño y de la muestra.

En la figura 4.6 se muestra la curva de potencia para ANOVA de un solo factor, a partir de la cual se genera el resultado del tamaño de la muestra mínima para lograr una potencia de la prueba de al menos 0.95. Como puede observarse en la figura 4.5 y 4.6 con un número de réplicas por tratamiento de al menos tres, es posible tener una potencia real de la prueba de 0.983748, superando el valor de potencia deseado.

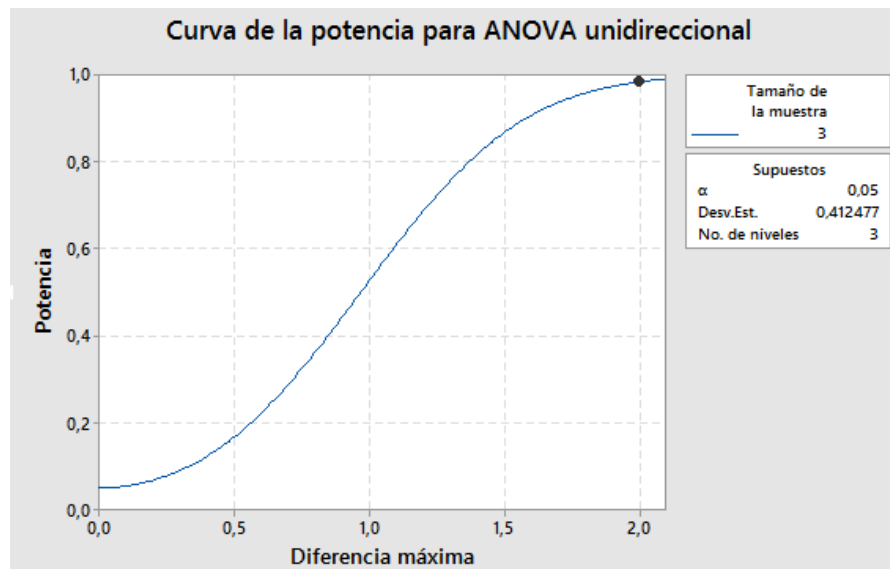


Figura 4.6. Curva de potencia para ANOVA de un solo factor dependiendo de la diferencia significativa máxima.

La última comprobación de supuesto del diseño completamente aleatorizado corresponde a la prueba de varianzas iguales. Esta prueba se realiza con el fin de validar que la suposición de varianzas iguales para el modelo lineal general, es cierta.

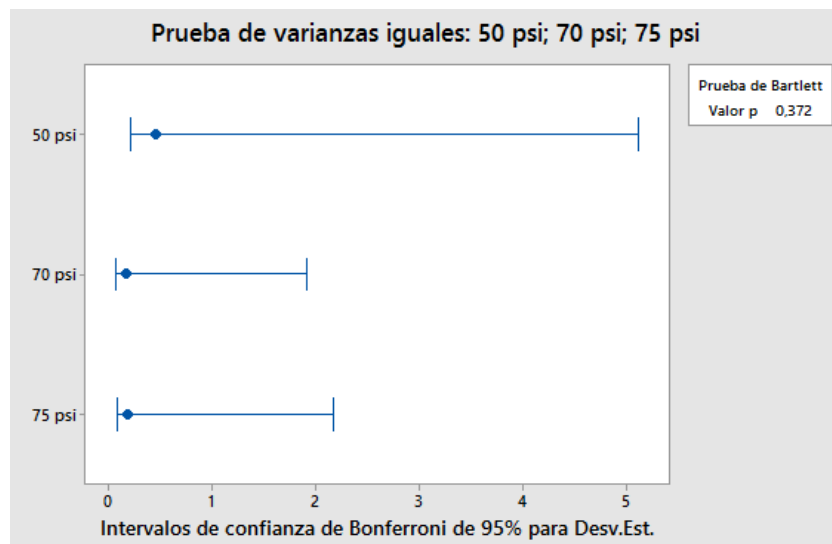


Figura 4.7. Gráfica de prueba de varianzas iguales para los datos de los tratamientos.

Para comprobar que el supuesto de la igualdad de varianzas para los datos de respuesta de cada tratamiento en el experimento es acertado, es posible verificar que los intervalos de desviación estándar de los datos se superpongan entre sí al proyectarse sobre el eje horizontal, tal y como ocurre en la figura 4.7. Dado que el valor p resultante de la prueba de Bartlett es mayor que 0.05 (derivado del nivel de significancia), no se puede rechazar la hipótesis nula de la igualdad de varianzas. Así, es posible confirmar que la suposición de la igualdad de varianzas se cumple.

Una vez realizadas las comprobaciones de los supuestos del *DCA*, se desarrolló el ANOVA, para evaluar la importancia del factor (presión) comparando las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores. La hipótesis nula (H_0) establece que todas las medias de los niveles de los factores son iguales mientras que la hipótesis alternativa (H_1) establece que al menos una es diferente. Como se menciona en la sección 2.4.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tratamientos	2	1,7496	0,87478	9,06	0,015
Error	6	0,5793	0,09656		
Total	8	2,3289			

Figura 4.8. Resultados de la prueba del ANOVA.

La figura 4.8 corresponde al resultado de la tabla 2.6 de fórmulas del *DCA* descrito en la sección 2.4, además del cálculo del valor de F y de p para la comprobación de la significancia estadística.

Es posible aceptar o rechazar la hipótesis planteada en el ANOVA a partir de los valores de F y de p . Si $\beta = 0.95$ es el nivel de confianza, y el valor p es menor a $1 - \beta$, se podrá rechazar la hipótesis. En este caso $p = 0.015 < 1 - \beta = 0.05$ por lo que es posible decir que existe significancia estadística entre al menos dos de los grupos de datos de respuesta.

El otro método utiliza la tabla de Fisher, teniendo en cuenta que el valor de F obtenido con el ANOVA es llamado $F_{calculada}$. El valor de $F_{calculada}$ es comparado con el valor de F de la tabla de Fisher o $F_{tabulada}$ que depende del nivel de confianza y de los grados de libertad (GL) de los tratamientos y del error.

Al generar la gráfica de distribución F , respecto a los grados de libertad de los tratamientos y el error calculados en el resultado del ANOVA previamente realizado, es posible identificar el límite de la zona de rechazo y la zona de aceptación de la hipótesis según el valor de F . Este es, el valor máximo que debe tener $F_{calculada}$ para que no exista significancia estadística y se apruebe la hipótesis.

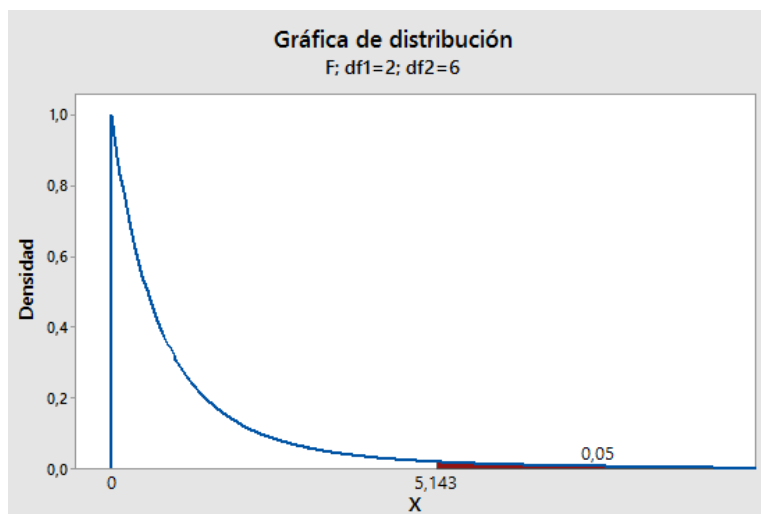


Figura 4.9. Gráfica de distribución F según grados de libertad obtenidos en el ANOVA.

Como puede observarse en la figura 4.9, el valor de la $F_{tabulada}$ es 5.143. Dado que $F_{calculada} = 9.06 > F_{tabulada} = 5.143$, es posible confirmar que si existe significancia estadística y por lo tanto se rechaza la hipótesis de que los resultados de los niveles del factor Presión reflejan datos sin diferencia estadística.

Debido a que no se conoce cual o cuales de los niveles cuentan con resultados que representen significancia estadística respecto a los otros, es necesario realizar pruebas de comparaciones múltiples por parejas de niveles. En este caso, se implementó la prueba de comparación de Bonferroni.

Esta prueba de comparación controla el nivel de confianza simultáneo para un conjunto completo de intervalos de confianza, es importante que el nivel sea simultáneo cuando se examinan los intervalos de confianza múltiples. El método de Bonferroni ajusta el nivel de confianza de cada intervalo individual, de modo que el nivel de confianza simultáneo resultante sea igual al valor que especifique, como se explica en la sección 2.4.

Comparaciones por parejas de Bonferroni: Respuesta = Concentración de Almidón [%]					
Agrupar información de agrupación utilizando el método de Bonferroni y una confianza de 95%					
Tratamientos	N	Media	Agrupación		
50	3	4,33927	A		
75	3	3,90927	A	B	
70	3	3,26630	B		
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.					
Pruebas simultáneas de Bonferroni para las diferencias de las medias					
Diferencia de Tratamientos	Diferencia de medias	EE de diferencia	IC simultáneo de 95%	Valor T	Valor p ajustado
70 - 50	-1,073	0,254	(-1,907; -0,239)	-4,23	0,017
75 - 50	-0,430	0,254	(-1,264; 0,404)	-1,69	0,423
75 - 70	0,643	0,254	(-0,191; 1,477)	2,53	0,133
Nivel de confianza individual = 98,33%					

Figura 4.10. Resultados de la prueba de comparación de Bonferroni.

Inicialmente los resultados arrojados por Minitab 17 con la prueba de Bonferroni, indican la formación de dos agrupaciones realizadas una llamada A y la otra B, el tratamiento 50 y 75 pertenecen al grupo A y el tratamiento 75 y 70 al grupo B, por lo tanto nos indica que el tratamiento de 50 y 70 son diferentes, estos no se pueden agrupar al compartir un grupo como se muestra en la figura 4.10. Además los rangos que se muestran en la columna *IC simultáneo de 95 %*, son los intervalos que aparecen en la figura 4.10, indicando que el 70-50 no pasan por cero, a diferencia de las otras dos parejas.

Por último el valor p se compara con $\alpha = 0.05$, dando como resultado que la pareja de 70 - 50 tiene un $p = 0.017 < 0.05$, rechazando la hipótesis nula de que los efectos de estos niveles son iguales, como se indica en la sección 2.4.

El resultado mostrado en la figura 4.11, expone que las parejas de tratamientos de 75 – 50 y 75 - 70 cruzan la línea punteada que indica el paso por cero, mientras que la pareja de tratamientos de 70-50 no los cruza la línea, por esta razón se determina que la pareja de tratamientos de 50 - 70 son significativamente diferentes.

Una vez conocido que la pareja de niveles de 50 y 70 psi son significativamente diferentes, es posible conocer qué nivel presenta mejores resultados en el experimento, realizando un análisis de la media de la eficiencia relativa para cada nivel de dicha pareja.

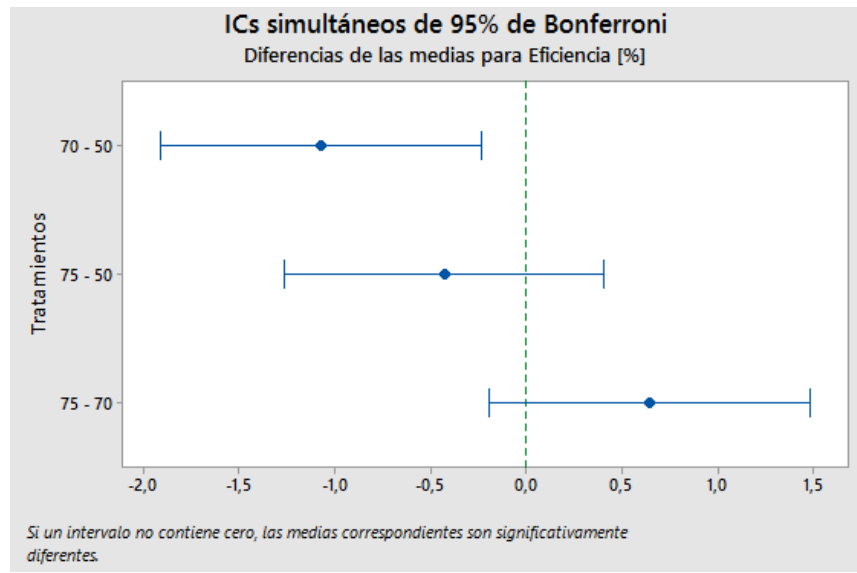


Figura 4.11. Intervalos de confianza simultáneos de 95% en la prueba de Bonferroni.

La gráfica de efectos principales muestra la media de los datos de cada nivel del factor para examinar cómo influyen estos niveles en las respuestas del experimento. Como se observa en la figura 4.12, al compararse directamente las medias de las respuestas de los niveles de presión de 50 psi y 70 psi, la media de respuesta del nivel de 50 psi es mayor a la media de respuesta de 70 psi, teniendo estas unos valores de 4.339 % y 3.266 % respectivamente. Dado que la media de respuesta ante un nivel de 50 psi en la presión de entrada es mayor que la media de respuesta de 70 psi, y que existe significancia estadística entre la media de estos dos niveles, es posible afirmar que el nivel de presión de 50 psi bajo las condiciones del flujo descritas anteriormente, aumenta la eficiencia relativa para ambas estaciones respecto a los niveles de presión de 70 y 75 psi.

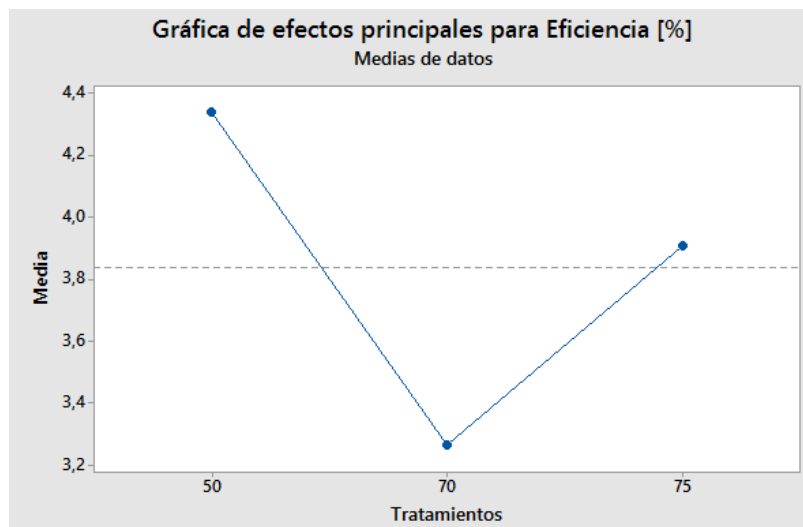


Figura 4.12. Gráfica de efectos principales de los niveles de presión.

Este resultado no corresponde a lo esperado según la revisión literaria realizada, donde al aumentar la presión el resultado de la eficiencia relativa debería ser mayor. Por esta razón la separación de sólidos en los hidrociclones representada en la eficiencia relativa, no es lo suficientemente alta para cumplir con las expectativas de la empresa. Sin embargo, el estudio realizado por (Trim y Marder, 1995) muestra que para presiones cercanas a 50.8 psi se logra una mejor eficiencia con una concentración de almidón en la entrada del 4.00 %. En este caso se presenta una similitud con los resultados obtenidos en este experimento, dado que la presión de mayor eficiencia relativa es de 50.0 psi a una concentración de sólidos promedio en la entrada de 4.55 % como se registra en la tabla 4.7. Vale la pena señalar que al analizar los datos consignados en las tablas 4.3 y 4.4, la masa de la mancha es mayor por la salida del Overflow, por lo tanto la separación de esta es mejor e incrementa la calidad del almidón al disminuir su contenido de mancha. Además, se puede evidenciar que la mayor cantidad de masa de agua es expulsada por el Overflow, propiciando la rápida sedimentación del almidón en los canales que reciben la lechada del Underflow en ambas estaciones.

4.3. Determinación del flujo de agua para recirculación.

En vista de que la concentración de sólidos (almidón y mancha) en el Overflow de la segunda estación es igual a 3.96 % a una presión de 50 psi como se muestra en la tabla 4.8, es viable incorporar el agua resultante del proceso en la segunda centrifuga pues cumple con los requisitos establecidos por la empresa de no superar el 10 % de concentración de sólidos. Esto genera un gran impacto en la reducción del consumo de agua en el subproceso de centrifugado, el cual tiene una alta demanda del recurso hídrico como se observa en el anexo A1. Esta reincorporación de 0.73 l/s de agua aproximadamente, se realiza una vez el flujo resultante del subproceso de separación pasa por tres de los canales de sedimentación, con el fin de disminuir más la concentración de sólidos presentes en el flujo del Overflow de la segunda estación.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto de ingeniería permiten definir ciertas conclusiones sobre el trabajo de la implementación y evaluación de las dos estaciones de separación hidrociclónica. Estas conclusiones se muestran en la Sección 5.1. A partir de estas es posible proponer diversas líneas de avance futuras para continuar mejorando el análisis del funcionamiento de los hidrociclones integrados al proceso de extracción de almidón de yuca y aumentar la eficiencia en este subproceso, como se muestra en la sección 5.2.

5.1 Conclusiones

Siguiendo la motivación que originó este proyecto de ingeniería, se realizaron estudios literarios sobre las plantas extractoras de almidón de yuca, el funcionamiento y parámetros de diseño de los hidrociclones, las diversas configuraciones que se pueden determinar con estos dependiendo de las necesidades y flujos de trabajo a los que serán sometidos.

Teniendo en cuenta que la planta trabaja a un flujo continuo de 3 l/s y los hidrociclones adquiridos por Deriyuca Ltda. tienen una capacidad de 0.8 l/s, se decidió que cada estación tuviera cuatro hidrociclones configurados en paralelo en vista de su capacidad, la continuidad y las condiciones del proceso, donde la lechada es conducida desde el subproceso de filtración plana al subproceso de sedimentación de forma directa por tuberías.

Previo a la toma de muestras y teniendo en cuenta que la variable explicativa del experimento es la presión modificada a 50, 70 y 75 psi, además de asumir que las condiciones del flujo de entrada a las estaciones hidrociclónicas es estable, se estableció que el número mínimo de muestras necesarias para lograr una confiabilidad en el experimento mayor a 95% es tres muestras por cada nivel de presión a analizar.

Con la información obtenida del software estadístico Minitab 17 y el análisis realizado a esta información se identificó que la presión de trabajo adecuada para obtener una mayor eficiencia en la concentración de almidón es a 50 psi. Con esta presión de entrada a las estaciones hidrociclónicas se logra una eficiencia relativa de 4.3393%, que corresponde a la media de eficiencia más alta entre los niveles de presión con diferencia estadística significativa.

Con los datos obtenidos de separación de sólidos y agua, y teniendo en cuenta que la presión de alimentación que ofrece una mayor eficiencia relativa es 50 psi, se determinó una concentración de almidón de 3.96 % en la salida del Overflow de la segunda estación. Dado que es necesario que la

concentración de sólidos sea menor al 10% para poder reincorporar lechada o agua en el subproceso de centrifugación, se concluye que es viable reincorporar el flujo proveniente del Overflow de la segunda estación en dicho subproceso. El flujo de lechada, con una partición de agua del 96.04 %, que se puede reutilizar en el subproceso de centrifugación es de 0.73 l/s en promedio, utilizando la presión de 50 psi en la alimentación de las estaciones hidrociclónicas.

Observando los datos de separación realizada por los hidrociclones que conforman las estaciones, se identificó que estos no realizan una buena separación de almidón lo cual logre disminuir la eficiencia de este, mientras que en la separación de agua y mancha realiza un mejor trabajo incidiendo en los datos de concentración de almidón

Dada la deficiencia en la separación de almidón, se deduce que la longitud del vortex de los hidrociclones adquiridos por la empresa, contribuye a la reducción de la eficiencia debido a que al disminuir la longitud se incrementa la probabilidad de succionar partículas grandes y/o de mayor densidad, las cuales buscarían salir por el Overflow y no por el Underflow como es debido.

5.2 Recomendaciones

Para futuros análisis se debe considerar la utilización de un tanque donde llegue la lechada y se homogenice la mezcla que entra en la alimentación del conjunto de estaciones, con el fin de reducir las posibles variaciones en la concentración y evitar alteraciones en la toma de muestras.

Además se propone, para disminuir posibles errores y alteraciones en las muestras, tener disponible un horno eléctrico en la rallandería. De esta manera se facilitaría realizar la prueba de materia seca sobre las particiones de almidón y mancha sin afectar las unidades experimentales con el transporte y el retardo en el inicio de la sedimentación.

Una vez identificado el nivel de presión al cual se logra la mayor eficiencia en el conjunto de estaciones hidrociclónicas, es posible implementar un sistema de control de presión para garantizar que esta se mantenga estable a pesar de variaciones en el flujo y otros disturbios en el sistema no previstos. Para la implementación de este sistema de control sería necesario contar principalmente con sensores de presión y caudal, además de un variador de velocidad y un controlador digital.

Dado que la eficiencia de separación de almidón está muy por debajo de la esperada, se recomienda revisar el diseño individual de los hidrociclones utilizados. Teniendo en cuenta la revisión literaria donde los hidrociclones con una menor longitud en el vortex generalmente tienen una mejor separación de sólidos, es necesario considerar opciones para modificar estas características en los hidrociclones utilizados, para mejorar la eficiencia de separación de sólidos.

Si se desea analizar el comportamiento de las estaciones al utilizar diferentes presiones en la primera y segunda bomba, es necesario considerar la variación en la velocidad del flujo por lo cual se requiere

que el tanque receptor del flujo del Overflow de la primera estación sea de un tamaño tal que pueda almacenar mayor cantidad de lechada y esta esté homogeneizando la mezcla constantemente, para garantizar la similitud de las características del fluido en la alimentación de la segunda estación.

Referencias Bibliográficas

Achor, M., & et.al. (2010). Some physical characteristics of microcrystalline starch obtained from maize and cassava. Journal o Pharmaceutical Sciences. (pp. 11-17).

Agriculture & Food Processing Machinery CC. Cassava Starch Technology and Machinery Introduction. [En línea] [Consultado 30 Mar. 2015]. Disponible en: <http://www.afpm.cn/cassavastarch.htm>

Alarcón, F. y Dufour, D. (1998). Almidón agrio de yuca en Colombia: Producción y recomendaciones. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia.

Arias, J. (2006). Modelos matemáticos de un hidrociclón en la extracción de almidón de yuca en plantas productoras de almidón del norte del Departamento del Cauca. Universidad del Valle.

Buriticá, P. (2011). Sistema hidrociclónico para la separación de almidón de Sagú.

Brabet, C.; Chuzel, G. et al. (1988). Improving cassava sour starch quality in Colombia, En: Dufour, D.; O'Brien, G. M.; y Best, R. (eds.). Cassava flour and starch: Progress in research and development. CIRAD-SAR y CIAT, Cali, Colombia. (pp. 241-246).

CECORA (1988). Diagnostico socioeconómico del Cauca, Santafé de Bogotá. Colombia (pp.150).

CIAT (1967). Centro de internacional de agricultura tropical. Investigación en yuca. [En línea] [Consultado 26 Mar. 2015]. Disponible en: <http://ciat.cgiar.org/es/investigacion-en-yuca?lang=es>

Coelho, M. A. y Medronho, R. A (2001). A model for performance prediction of hydrocyclones. Chemical Engineering Journal, volumen 84, numero 1. (pp. 7 -14).

Santiago, E. y Díaz, J. (2016). Diseño experimental para la evaluación del efecto de tres variables de proceso sobre la eficiencia de dos estaciones de separación hidrociclónicas.

Eggleston, G., Omoaka, P. y Arowshegbe, A. (1993). Flour, starch and composite breadmaking quality of various cassava clones. Journal of the Science of Food and Agriculture, volumen 62, numero 1 (pp. 49-59).

Etayo, J. (2005). Modelo matematico de un hidrociclón de cono truncado en el beneficio de carbones del sur occidente colombiano. Universidad del Valle.

Guillaume, D., et.al. (2008). Cassava Starch Processing at Small Scale in North Vietnam. Starch/Stärke. (pp. 358-372).

Hoffmann, A. y Stein, L. (2008). Gas Cyclones and Swirl Tubes – Principles, Design and Operation.

Hougen, O., Watson, K. y Ragatz, R. (1982). Principios de los procesos químicos. Editorial Reverte S.A

Manickavasagan A. y Thangavel, K. (2006). Single Hydrocyclone for Cassava Starch Milk,” Agricultural Mechanization in Asia, Africa, and Latin America (pp. 80 – 84).

Marder, R. (1994). Evaluate the Use of Hydrocyclones for Water Conservation and Effluent Reduction in the Cassava Starch and Sago Industry. India.

Melo, O., López, L. y Melo, S. (2007). Diseño de experimentos: métodos y aplicaciones. Editorial Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

Moreno, M., River, M., Alarcón, F., Ruiz, R. y Dufour, D. (2001). Almidón agrio de yuca en Colombia. Publicación CIAT, número 323.

Moreno, M., River, M., Alarcón, F., Ruiz, R. y Dufour, D. (2002). Almidón agrio de yuca en Colombia. Tomo 2: Planta procesadora: Descripción y planos de los equipos. Publicación CIAT, número 323.

Richard Mozley Limited. Two inch hydrocyclone assemblies. United Kingdom.

Ortega, E. (2004). Review: Applications of Liquid Cyclone in Biological separations. Engineering "Life" Science (pp. 119-123).

Pabón, D. (2015). Balance de masa en planta de extracción de almidón Deriyuca Ltda. Escuela de ingeniería mecánica, Universidad del Valle, Colombia.

Pérez, E., Lares, M., González, Z. y Tovar, J. (2007). Production and Characterization of Cassava (Manihot esculenta CRANTZ) Flours using different thermal treatments, Interciencia, volumen 32, numero 9.

Radley, J. (1976). Starch production technology. Applied Science Publishers Ltd., London.

Rangaswami, G. (1993). Tapioca based industrial complex. Prosperity 2000 (II), India (pp. 123-137).

Reina, J. (2011). Implementación de hidrociclones en el proceso de extracción de almidón de yuca para la separación almidón-proteína y la influencia en la calidad del almidón agrio. Universidad del Valle.

Rey, J. (2013). Desarrollo de un sistema piloto de separación de harina de yuca por vía húmeda para la producción de almidón.

Saengchana, K., Nopharatanab, A. y Songkasiric, W. (2009). Enhancement of tapioca starch separation with a hydrocyclone: effects of apex diameter, feed concentration, and pressure drop on tapioca starch separation with a hydrocyclone, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, n° 48 (pp. 195-202).

Soporte de Minitab 17. [En línea] [Consultado 28 Nov. 2015]. Disponible en: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/anova/basics/what-is-anova/>

Sreenarayanan, V.V.; Swaminathan K. R. y Varadaraju N. (1990). Tapioca processing-Problems and prospects. Green book on tapioca, Sagoserve, Salem, India (pp. 24-27).

Svarovsky, L. (2000). Hidrociclones, de Solid - Liquid Separation, Oxford, Butterworth -Heinemann (pp. 191-243).

Svarovsky, L (2000). Solid Liquid Separation, Cuarta Edición, Butterworth-Heinemann.

Thai Tapioca Starch Association. Manufacturing Process Development in Thai Cassava Starch Industry. [En línea] [Consultado 04 Abr. 2015]. Disponible en: <http://www.thaitapiocastarch.org/article01.asp>

Trim, D. y Marder, R. (1995). Investigations of Hydrocyclones for Concentration of Cassava Milk. [En línea] [Consultado 12 Jun. 2016]. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/star.19950470805/full>

Trim, D. y Marder, R. (2000). Investigations of Hydrocyclones for Concentration of Cassava Milk. Natural Resource Institute. SVAROVSKY L, Solid - liquid separation fourth edition.

van Esch, Frans. (1991). The Efficiency of Hydrocyclones for the Separation of Different Starches. [En línea] [Consultado 26 de Mar. 2016]. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/star.19910431104/abstract>

Vélez, G. (2008). Implementación de la Separación Hidrociclónica en el Proceso de Extracción de Almidón de Yuca en las Plantas Procesadoras de Yuca del Norte del Cauca. Universidad del Valle.

Verberne, P. (1977). A New Hydrocyclone Process for the Production of Potato Starch with Lowest Fresh Water Consumption. *Die Stärke*. (pp. 303-307).

Waliszweski K., Garcia Alvarado M. y De la Cruz Medina J. (2007). Kinetics of enzymic hydrolysis of cassava flour starch - optimization and modelling. *International Journal of Food Science & Technology*, volumen 27, número 4 (pp. 465-472).

Yang, W. (2003). *Handbook of Fluidization and Fluid Particle Systems*.

Zakhia, N.; Dufour, D. et al. (1996). Review of sour cassava starch production in rural Colombian areas. *Tropical Science* 36 (pp. 247-255).

Anexos

A1. Balance de masas proporcionado por la empresa Deriyuca Ltda.

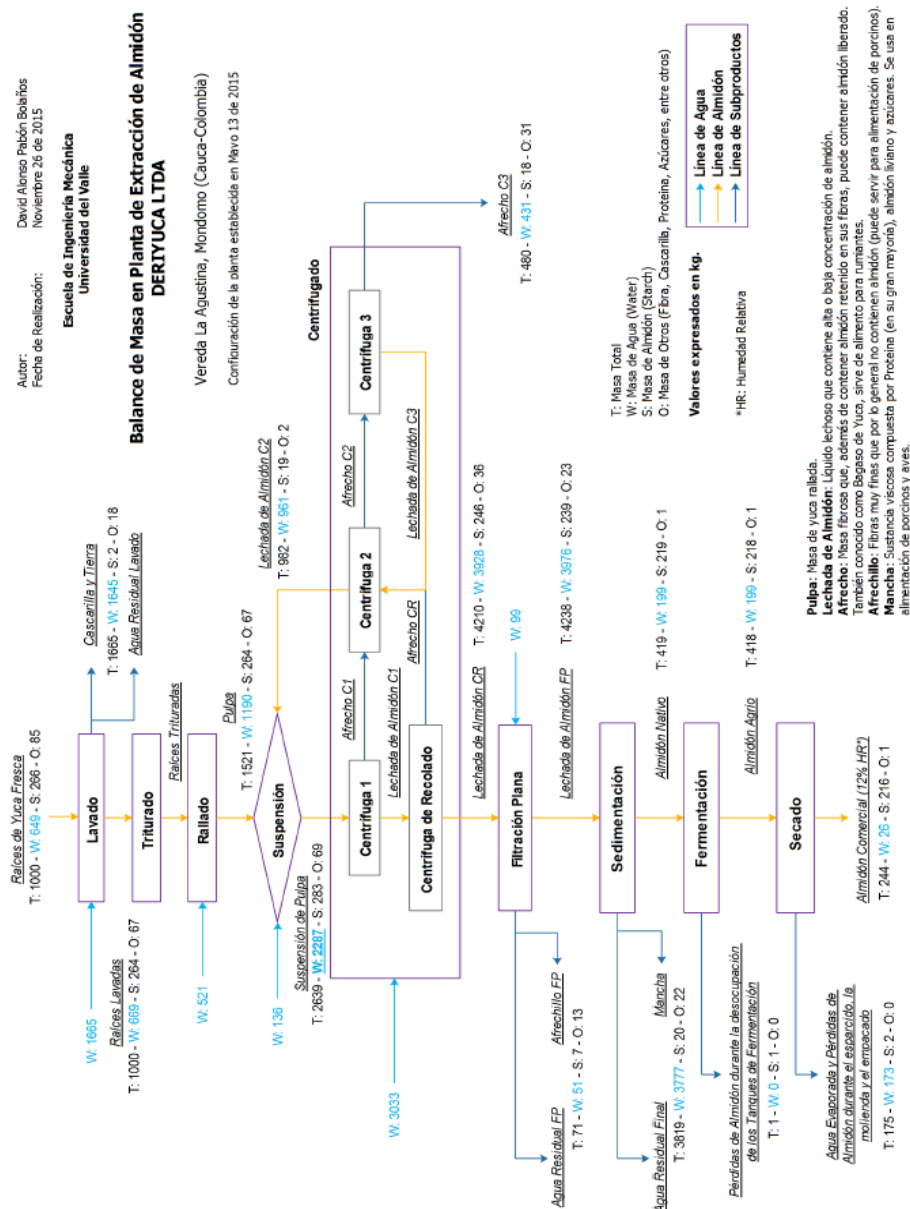


Figura A1.1. Balance de masas de la planta extractora perteneciente a la empresa Deriyuca Ltda. Realizado por el CIAT.

Fuente: (Pabón, 2015)

A2. Fotografías de las estaciones hidrociclónicas implementadas.



*Figura A2.1. Vista en perspectiva de las estaciones hidrociclónicas.
Fuente: Propia.*



*Figura A2.2. Vista frontal de las estaciones hidrociclónicas.
Fuente: Propia.*

A3. Almidón y mancha después de la prueba de materia seca.



Figura A3.1. Recipientes con almidón y mancha después de la prueba de materia seca.

Fuente: Propia.